EL ANTROPOCENO

Una breve introducción

Erle C. Ellis



El presente volumen aborda de una forma global, documentada y actual el impacto que las actividades humanas —y muy especialmente a lo largo de los dos últimos siglos— vienen dejando en el planeta Tierra en su conjunto, un impacto cuya huella en su superficie ha dado lugar a lo que puede considerarse una nueva era geológica: el Antropoceno. Asentado en una sólida base científica, Erle C. Ellis traza de forma sumamente interesante y multidisciplinar (desde la biología a la economía, pasando por la geología, la química, la gestión ambiental, la agricultura, la arqueología…) la historia de este proceso ya irreversible, a fin de plantear las posibles alternativas que se ofrecen a la especie humana para afrontarlo, sin rehuir tampoco, alejándose del radicalismo y de dogmas ideológicos, los aspectos filosóficos y políticos que lleva aparejados.

Erle C. Ellis

El Antropoceno

Un breve introducción

ePub r1.0
Titivillus 26.07.2023

Título original: *Anthropocene: A Very Short Introduction*
Erle C. Ellis, 2018
Traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro

Editor digital: Titivillus
ePub base r2.1

Prefacio

Reescribir la historia es un proyecto ambicioso. Más aún cuando versa sobre un planeta entero y se presenta un nuevo protagonista. Pero ese es precisamente el objetivo de este libro.

La historia de este planeta y nuestra repercusión en él se está reescribiendo para incluir un capítulo nuevo, un capítulo en el que usted desempeña un papel capital. El ser humano, o *ánthrōpos*, ha alterado tanto el funcionamiento de la Tierra que ahora se está proponiendo desde el ámbito científico reconocer una nueva etapa del tiempo geológico: el Antropoceno. A diferencia de lo ocurrido con los intervalos geológicos previos, la propuesta de introducir un espacio temporal en el que el ser humano se ha convertido en una «gran fuerza de la naturaleza» ha saltado desde el mundo académico y desde otros ámbitos ajenos a él.

El futuro del Antropoceno está por resolverse. El debate científico sigue girando en torno a las diversas propuestas para determinar una «era de los humanos», incluyendo la opción de rechazar el Antropoceno de plano. Como se trata de un proceso en curso, ningún libro puede contener la última palabra sobre lo que es o será el Antropoceno. Mi objetivo es más simple: aportar la información necesaria para entender el Antropoceno como propuesta científica y explicar por qué ha alcanzado tanta repercusión. Confío, además, en que a usted le sirva tanto como a mí para perfilar de un modo más consciente y proactivo un futuro mejor para esta era del ser humano.

Agradecimientos

No podría haber creado este libro sin el apoyo de mi esposa, Ariane de Bremond. Mi padre, Robert Ellis, me animó a escribirlo, y mis hijos, Ryan y Amaia, me aportaron la inspiración. Debo a Matthew Edgeworth, Martin Head, Peter Kareiva, Laura Martin, John McNeill, Will Steffen, Chris Thomas, Zev Trachtenberg y Alex Wolfe la revisión de los capítulos y sus inestimables consejos para mejorarlos. Los comentarios e indicaciones de Mark Maslin, Tim Lenton y Andrew Bauer sirvieron para avanzar en el trabajo y facilitaron las revisiones, y Jared Margulies, Adam Dixon y Jason Chang aportaron opiniones útiles. Mis compañeros del Grupo de Trabajo del Antropoceno de la Subcomisión de Estratigrafía del Cuaternario de la Comisión Internacional de Estratigrafía han dado forma a mis ideas de muchas maneras. Mi agradecimiento a todos ellos, en especial a Jan Zalasiewicz, Colin Waters y Mark Williams, que me hicieron sentir bien acogido, incluso cuando mis puntos de vista sobre la delimitación del Antropoceno dentro de la escala del tiempo geológico se apartaban de la opinión de consenso. Latha Menon me brindó un asesoramiento editorial inestimable y Jenny Nugee se aseguró de que todo estuviera como debía. Este libro se compuso durante una excedencia de mi puesto en la Universidad de Maryland, condado de Baltimore, con financiación del Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente de la Universidad de Berna en Suiza. Agradezco a ambas instituciones su apoyo.

1. Orígenes

«¡Estamos en el Antropoceno!», exclamó con frustración durante una conferencia en el año 2000 el especialista en química atmosférica y premio Nobel Paul Crutzen. ¿Por qué sus colegas seguían denominando Holoceno a nuestra época? Es más que evidente que el ser humano ha remodelado la Tierra desde el fin de la última glaciación, cuando dio comienzo el Holoceno. A partir de ese momento, la propuesta de cambiar el nombre del actual intervalo geológico de la Tierra por otro relacionado con el ser humano, el *ánthrōpos*, ha ido cobrando una fuerza extraordinaria (y también críticas) tanto dentro como fuera de la investigación.

¿Por qué un término geológico tan esotérico se ha convertido con tanta rapidez en un foco del debate académico y en un fenómeno popular en todo el mundo? Para entenderlo hay que ahondar, más allá de la ciencia, en las historias sobre orígenes que se han contado en las sociedades humanas desde el principio de los tiempos.

Desde la prehistoria hasta el presente, el papel del ser humano en la naturaleza (como descendiente de ella, compañero, administrador, jardinero o destructor) se ha definido y redefinido una y otra vez en los relatos que explican la emergencia del ser humano en la Tierra. En las religiones abrahámicas, las historias de orígenes otorgaron al ser humano un lugar privilegiado en el centro de la creación divina. Copérnico y Darwin construyeron nuevas crónicas a partir de datos científicos, y la humanidad se convirtió en un animal más de un planeta más de los que orbitan alrededor de una estrella ordinaria más.

El Antropoceno exige que afinemos aún más la perspectiva. A medida que especialistas en geología y en otras materias batallan a favor y en contra de diversas propuestas para formalizar el Antropoceno, no es de extrañar que sus esfuerzos se hayan entremezclado tanto con cosmovisiones antiguas como con debates contemporáneos sobre el papel del ser humano dentro de la naturaleza, y hasta sobre el significado de ser humano.

Una gran fuerza de la naturaleza

El exabrupto de Crutzen provenía de su experiencia investigando los cambios provocados por el ser humano en la atmósfera terrestre y sus intensas consecuencias globales: el agujero en la capa de ozono que protege la Tierra y el cambio climático global. Oír a sus pares hablar del estado actual de la Tierra sin hacer ninguna alusión a estos cambios antropogénicos severos fue demasiado para él. Ya era hora de admitir que las condiciones más o menos estables de la época del Holoceno habían concluido.

Crutzen no estaba solo. El ecologista Eugene Stoermer había estado empleando el término *Antropoceno* de manera informal con estudiantes y compañeros de profesión desde la década de 1980. En el año 2000, ambos publicaron una breve nota en una revista científica que supuso la primera aparición formal del término en una publicación, aunque el escritor del *New York Times* Andy Revkin había utilizado *Antroceno* en el libro que escribió sobre el cambio climático en 1992. En esta primera publicación, Crutzen y Stoermer relacionaron el Antropoceno con las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la quema de combustibles fósiles, y lo fechaban en el inicio de la Revolución Industrial, a finales del siglo XVIII. Para ello se basaron en gran cantidad de trabajos previos que describían los cambios ambientales antropogénicos. Con la propuesta de Crutzen, todos aquellos cabos sueltos se unían al fin en una propuesta que señalaba la emergencia de la humanidad como una «gran fuerza de la naturaleza» dentro del registro histórico de la Tierra.

Cambiar la historia

En la actualidad hay una cantidad abrumadora de signos que confirman que el ser humano está alterando el planeta de maneras que no tienen ningún precedente. El cambio climático global, la acidificación de los océanos, la modificación de los ciclos del carbono, el nitrógeno y otros elementos a una escala planetaria, la transformación de bosques y otros hábitats naturales en granjas y ciudades, la contaminación generalizada, la lluvia radiactiva, la acumulación de plástico, la alteración del curso de los ríos, la extinción masiva de especies, la movilidad humana y la introducción de especies alóctonas en todo el mundo. Estos son solo algunos de los diversos cambios ambientales globales provocados por el ser humano que con gran probabilidad dejarán una huella duradera en las rocas, que suponen la base para delimitar nuevos intervalos en el tiempo geológico.

Con tal abundancia de señales, parece que no debería haber ningún problema para aceptar la propuesta de reconocer el Antropoceno como un nuevo intervalo de tiempo geológico, la época del Antropoceno. Y, sin embargo, ocurre todo lo contrario. El Antropoceno sigue siendo muy controvertido incluso entre especialistas en ciencias de la Tierra. Se discute si hay suficientes fundamentos científicos para admitir una época tan breve y novedosa, mientras que otras voces discuten cuál sería su ubicación temporal óptima y los signos que tenemos de ella. Las propuestas para situar el comienzo del Antropoceno van desde el primer momento en que la humanidad controló el uso del fuego, hasta el tiempo en que aumentó la explotación agrícola hace más de 10 000 años, pasando por el año de la máxima incidencia de la lluvia radiactiva en 1964, todo ello apoyado en pruebas que van desde las burbujas de gas atrapadas en testigos de hielo y depósitos generalizados de hollín y núcleos radiactivos, hasta la aparición de polen de maíz domesticado en testigos de sedimentos de todo el mundo. Y esto solo araña la superficie de los numerosos debates que suscita la propuesta del Antropoceno.

La propuesta de rebautizar nuestra época como la «era de los humanos» probablemente ha sido aún más perturbadora fuera del ámbito de las ciencias de la Tierra, pues ha suscitado intensos debates, discusiones continuas e investigaciones nuevas y transformadoras en disciplinas tan variadas como la filosofía y la arqueología, la antropología, la geografía, la historia, la ingeniería, la ecología, el diseño, el derecho, las artes y las ciencias políticas. El debate sobre el Antropoceno ha llegado incluso a los medios de comunicación y a la esfera pública, desde los dispensadores de agua hasta la música popular. ¿Significa la edad del ser humano el fin de la naturaleza? ¿Quién es responsable del Antropoceno? ¿El *Homo sapiens*? ¿Los primeros agricultores? ¿Los consumidores adinerados de la era industrial? ¿Y es necesariamente el Antropoceno una catástrofe (un desastre medioambiental y el fin de la humanidad) o podría haber un «Antropoceno bueno» que permitiera tanto a la humanidad como a la naturaleza prosperar juntos en un futuro lejano?

Las numerosas y acaloradas controversias en relación con el Antropoceno evidencian que con él se plantea mucho más que un nuevo intervalo del tiempo geológico. La relevancia del Antropoceno reside en que propone una lente nueva con la que revisar y reescribir narrativas y cuestiones filosóficas que vienen de antiguo. El Antropoceno es, al mismo tiempo, una interpretación nueva que relaciona al ser humano con la naturaleza y un

paradigma científico nuevo y audaz (una «segunda revolución copernicana») capaz de realizar una revisión rompedora de lo que creemos que significa ser humano.

Historias de orígenes

Las sociedades humanas siempre han recurrido a historias para explicar los orígenes de su pueblo y su relación con el mundo y sus múltiples actores, desde animales y plantas hasta seres y fuerzas envueltos en más misticismo. Para la Grecia de la Antigüedad, la Tierra, convertida en la diosa Gaia, surgió del vacío y dio origen a toda la vida y a los progenitores de sus numerosos dioses, desde Atenea hasta Zeus. Los antepasados humanos mortales de los griegos solo aparecen después de la creación de varias razas humanas anteriores, que los dioses expulsaron por considerarlas deficientes, o, según otra historia de sus orígenes, el dios Prometeo crea a los humanos a partir de arcilla y les permite prosperar entregándoles fuego robado a los dioses. El mensaje está claro. La Tierra, encarnada en Gaia, crea y mantiene toda la naturaleza, incluidas las fuerzas siempre combativas de los dioses. Los seres humanos son unos segundones dentro de la mitología de la antigua Grecia, que tienen suerte de existir y solo prosperan con ayuda del don del fuego de Prometeo. Como veremos, tanto Gaia como Prometeo son cruciales en las historias de orígenes del Antropoceno.

En el primer relato del Génesis hebreo, un único dios todopoderoso crea el cosmos, la Tierra y los seres humanos en una sucesión ordenada. En el segundo relato, primero crea al hombre, luego la naturaleza (el jardín del Edén) y después a la mujer. Llevan una vida regalada hasta que son tentados por el «árbol de la ciencia». Un Dios enojado los expulsa del Edén y con ello los obliga a ellos y a sus descendientes a cultivar por siempre la Tierra para sobrevivir. A través de esta narración descubrimos por qué los seres humanos, a pesar de su privilegiado papel central en la creación de Dios, están obligados a esforzarse para cultivar la tierra tras su Caída.

A través de relatos que enlazan el cosmos, la Tierra y las personas con todos los demás actores y fuerzas con los que deben interaccionar, las historias de orígenes cuentan quiénes somos, de dónde venimos, cuál es nuestro cometido en la Tierra y qué relaciones mantenemos con el resto de la naturaleza. De manera análoga, el Antropoceno presenta el relato de un planeta modificado por los seres humanos. Pero ¿cómo y por qué nos

convertimos los humanos en transformadores del planeta? El Antropoceno exige una explicación.

23 de octubre del año 4004 a. C.

A las seis de la tarde del 23 de octubre de 2004, científicos de la Sociedad Geológica de Londres dedicaron un brindis al arzobispo James Ussher de Armagh. Según el obispo Ussher, el 23 de octubre de 4004 a. C. fue la fecha y el momento precisos de la creación. Según su datación, realizada en 1650, el universo tenía exactamente 6008 años. Aunque estos conocedores del tiempo geológico hicieron aquel gesto solo como un divertimento, resulta revelador que celebraran una cronología del universo tan obsoleta. La precisión de Ussher tal vez dé risa hoy en día, pero tenía un propósito muy claro: otorgar más credibilidad a su historia de orígenes.

Incluso antes del auge de los métodos científicos occidentales, ya se elaboraban cronologías precisas de los acontecimientos clave en la historia de la Tierra y de la humanidad mediante el análisis esmerado de pruebas fiables. El obispo Ussher utilizó la Biblia para elaborar su interpretación cronológica.

Tras una compilación laboriosa de la historia generacional (por ejemplo, Jacob engendró a José) y los acontecimientos fechados (como la destrucción del templo de Jerusalén) y la aplicación de cálculos creativos, produjo una cronología precisa que conectaba el cosmos, la Tierra, los orígenes de la humanidad y la historia de la sociedad occidental. Muchas otras sociedades, como la maya y la hindú, también elaboraron cronologías detalladas para conectar la formación del cosmos con la historia humana basándose en parte en minuciosas observaciones astronómicas. Esta inversión generalizada de conocimientos especializados en la obtención de cronologías detalladas confirma su utilidad social mucho antes de la emergencia de la ciencia occidental, para conferir autoridad a las instituciones y a los expertos que las crearon y sostuvieron.

El trabajo científico contemporáneo ha dado lugar a una historia de los orígenes de una forma más elaborada, precisa, sistemática y constatable al vincular el cosmos, la Tierra, la vida y la historia humana dentro de una cronología única, cada vez más detallada y continuamente mejorada. Pero, incluso ahora, muchas comunidades tradicionales, tanto religiosas como seculares, siguen manteniendo sus propias historias de orígenes independientes, rivales y en fuerte contraste con las pruebas científicas, a

menudo frente a considerables presiones sociales. Por ejemplo, algunos aún defienden la cronología de la «Tierra joven» del obispo Ussher.

La razón principal de este rechazo debe quedar clara. Como la historia de orígenes de la ciencia contemporánea redefine la relevancia y las relaciones de los seres humanos, la Tierra y el cosmos, con ello cuestiona algunas de las creencias tradicionales más arraigadas en las sociedades de todo el mundo. En esta narrativa no hay espacio para un Dios todopoderoso o cualquier otra fuerza mística. El ser humano no ocupa ningún lugar central en el universo. El Antropoceno va más lejos aún, porque no solo cuestiona estas creencias tradicionales, sino que además revisa la interpretación clásica de la ciencia contemporánea. El Antropoceno vuelve a otorgar a los seres humanos un papel central en la Tierra como transformadores del planeta.

La primera revolución copernicana

El 4 de junio de 1539, Martín Lutero habló a sus discípulos sobre «la aparición de cierto astrólogo empeñado en demostrar que es la Tierra lo que se mueve, y no el cielo, el Sol y la Luna». Aquel astrólogo era Nicolás Copérnico, y su teoría heliocéntrica acabaría apartando la Tierra del centro del universo.

Durante milenios, la única historia admisible sobre el origen del mundo occidental estuvo centrada en la Tierra y partía de su creación por parte de un Dios cristiano. La verdad literal de la historia bíblica sobre los orígenes dependía de esta visión geocéntrica. Como es lógico, los esfuerzos para apartar la Tierra y la humanidad del centro del cosmos encontraron una gran resistencia. Se necesitó más de un siglo y el trabajo de Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galileo Galilei y, por último, Isaac Newton para que la revolución copernicana triunfara. Pero lo hizo. A finales del siglo XVII la Tierra dejó de ocupar el centro del universo, al menos entre la intelectualidad científica occidental, y con ello se hizo más evidente la necesidad de contar con una historia de orígenes nueva para la Tierra y el cosmos.

Los estratos del tiempo

Incluso un siglo después de que Ussher publicara su cronología, estudiosos como Isaac Newton seguían creyendo que la Tierra no tenía más de 6000 años. El primero en cuestionarlo fue el naturalista francés Georges-Louis

Leclerc, conde de Buffon (1707-1788), quien publicó estimaciones a finales del siglo XVIII que atribuían a la Tierra 74 000 años de antigüedad. Su estimación se ridiculizó de inmediato, y él se retractó bajo presión, aunque en realidad creía que la Tierra tenía más edad aún, tal vez incluso millones de años.

La base científica para la datación de intervalos de tiempo geológico llegó con el descubrimiento de que los patrones distintivos de bandas de materiales y criaturas fósiles observados en rocas y sedimentos expuestos podían organizarse de acuerdo con un sistema de capas horizontales (o *estratos*) formadas una encima de otra. A principios del siglo XIX se creó la ciencia de la estratigrafía como una rama de la geología. Charles Lyell publicó en 1838 su obra *Elements of Geology* [«Elementos de geología»], donde organizaba las principales capas estratigráficas identificadas por otros en intervalos temporales sucesivos, y las relacionaba, sobre la base de un concepto de cambio gradual continuo, de modo que fuera posible calcular la duración de dichos intervalos. En 1867, tras reunir todo aquello, emitió una de las primeras estimaciones con base científica de la edad de la Tierra: 240 millones de años. Sus contemporáneos, entre ellos lord Kelvin, efectuaron cálculos similares que empezaron a desmoronar la noción de una Tierra mucho más joven, lo que allanó el camino para una historia de orígenes totalmente nueva para el cosmos, la Tierra y las personas.

El mono desnudo

Igual que en geología se revisó la posición de la Tierra dentro del orden cósmico del tiempo, la biología se replanteó los orígenes de la vida y del ser humano. Y el problema principal fue el tiempo: se necesitaba en grandes cantidades.

Charles Darwin fue un gran estudioso de la geología, sobre todo del trabajo de Lyell, quien lo asesoró tras su viaje en el Beagle. Lo invitaron a presentar su obra en la Sociedad Geológica de Londres y pronto salió elegido para formar parte de su consejo rector. Pero el mayor interés de Darwin era entender por qué «una especie se transforma en otra». En 1837, esbozó este proceso a modo de ramificaciones de un solo árbol genealógico. Sin embargo, Darwin necesitaría casi veinte años y el temor a que se le adelantara Alfred Russel Wallace para publicar al fin su teoría de la evolución por selección natural en 1859.

Tal vez resulte extraño que esperara tanto tiempo para publicar uno de los descubrimientos más importantes de todos los tiempos. Pero Darwin tenía buenas razones. Como hombre religioso, Darwin era muy consciente de la controversia que iba a desencadenar su teoría. La afirmación de que las especies aparecían con el paso del tiempo por evolución (sin necesidad de una intervención divina) no resultaría fácil de conciliar con la historia de orígenes del Génesis. Trabajó durante años para consolidarla.

Para confirmar su teoría de la evolución por selección natural, Darwin necesitaba tres cosas. Debía disponer de pruebas que demostraran que las especies no son eternas y que las especies nuevas aparecen después de otras precedentes. Los fósiles del registro geológico lo corroboraban. Necesitaba algún proceso de presión que empujara a las especies a transformarse en formas nuevas. La teoría de Malthus de que los recursos limitan el crecimiento de las poblaciones le servía como proceso de presión: no todos los individuos pueden sobrevivir a la competencia por los recursos limitadores. Su estudio de la cría de animales y plantas (la selección artificial) demostró que las presiones selectivas pueden producir razas, linajes y variedades muy diferentes a partir de poblaciones de una misma especie. Pero lo que más necesitaba Darwin era tiempo.

Sin grandes intervalos de tiempo geológico, de cientos de millones de años, no habría manera de explicar cómo surgió la miríada de especies de la Tierra a través tan solo de la selección natural. Por suerte la geología no tardó en estimar la edad de la Tierra en cientos de millones y, después, en miles de millones de años. La teoría de Darwin siguió cobrando fuerza. En 1871, dio un paso más y centró la teoría evolutiva en la historia de los orígenes humanos en la obra *El origen del hombre*[1]. Los orígenes de la humanidad no eran diferentes de los de cualquier otro animal. Nuestra historia era la de un «mono desnudo» que descendió de otros simios en el transcurso de un periodo larguísimo de tiempo geológico. Con la teoría de la evolución por selección natural de Darwin nació un nuevo relato de orígenes que enlazaba toda la vida, incluida la humana, a través de la descendencia de un ancestro común en un «árbol de la vida» universal.

En los círculos científicos, el tiempo geológico reemplazó con rapidez el tiempo bíblico, y la evolución por selección natural invalidó la historia de orígenes del Génesis. Un relato de orígenes nuevo y secular conectó la Tierra, la vida y las personas. Tal como señaló Thomas H. Huxley, presidente de la Sociedad Geológica de Londres en 1869, «la biología toma su tiempo de la geología». Y, a diferencia de lo que sostiene la historia del Génesis, los seres

humanos no desempeñaban ningún papel especial, sino que eran una especie entre muchas otras que evolucionaban sin rumbo fijo en un planeta cambiante.

Un papel secundario

Después de Darwin, y tras los rápidos avances que se produjeron en astronomía, también se reescribió la historia de la posición que ocupa el ser humano en la historia del universo. El cosmos se originó hace 13 800 millones de años en una explosión gigantesca, o Gran Explosión (*Big Bang*). La Tierra se formó a partir de polvo y gas miles de millones de años después, y se solidificó en forma de planeta hace 4500 millones de años. La Tierra, uno de los ocho planetas que giran siguiendo una órbita irregular alrededor de una estrella enana amarilla de lo más vulgar, se encontraba en el brazo espiral de una galaxia formada por más de 100 000 millones de estrellas y que, junto con más de 100 000 millones de galaxias, que en total albergan unos mil trillones de estrellas, conforman un universo en continua expansión.

Lo más probable es que la vida surgiera por primera vez en la Tierra hace más de 3800 millones de años en forma de bacterias, y que evolucionara hasta convertirse en organismos unicelulares más complejos con núcleo, los eucariotas, hace casi 2000 millones de años. La evolución dio lugar a los primeros organismos pluricelulares hace más de 1000 millones de años, y los primeros animales simples, hace unos 800 millones de años. La vida colonizó los continentes del planeta hace unos 480 millones de años y en ellos evolucionó y dio lugar a gran cantidad de formas que en su mayoría se perdieron para siempre, como ocurrió con los dinosaurios no aviares, en uno de los cinco sucesos de extinción masiva ocurridos hace cientos o decenas de millones de años. La evolución produjo los primeros mamíferos hace 200 millones de años, más tarde los primeros primates (hace 65 millones de años) y después las primeras especies de nuestro linaje directo, el género *Homo*, unos 2,8 millones de años atrás. Estas primeras especies humanas, los homininos, fueron las primeras en tallar herramientas de piedra, controlar el fuego y salir de África para dispersarse por Eurasia. No nosotros.

El *Homo sapiens* emergió en un mundo donde había otras especies de homininos que fabricaban herramientas y controlaban el fuego hace tan solo unos 300 000 años. Tuvieron que pasar 200 000 años para que los humanos exhibieran algunos rasgos distintivos, además de una anatomía menos robusta y un cráneo algo más pequeño y con una forma un tanto diferente. Con el

tiempo habría de llegar un momento en el que el *Homo sapiens* adoptara una forma de vida distinta, se propagara por todo el planeta y hasta saliera de él. Pero esto solo sucedería en los últimos segundos del calendario cósmico (figura 1). Durante la mayor parte del tiempo que lleva el ser humano en la Tierra, nuestra especie solo fue una más de las diversas que conformaron el género *Homo* entre millones de especies más que vivían en un planeta corriente que orbitaba alrededor de una estrella común en una galaxia ordinaria en un vasto universo.

Momento del año	**ka**	**Acontecimiento**
1 de enero	13 800 000	Gran Explosión
1 de mayo	8 500 000	La Galaxia
2 de septiembre	4 600 000	El Sistema Solar
6 de septiembre	4 400 000	Rocas más antiguas
21 de septiembre	3 800 000	Vida (células simples sin núcleo)
9 de octubre	3 400 000	Fotosíntesis (cianobacterias)
29 de octubre	2 400 000	Oxigenación de la atmósfera
15 de noviembre	2 000 000	Eucariotas (primeras células con núcleo)
5 de diciembre	800 000	Primeros organismos pluricelulares
20 de diciembre	450 000	Plantas terrestres
23 de diciembre	300 000	Reptiles
25 de diciembre	230 000	Dinosaurios
26 de diciembre	200 000	Mamíferos
27 de diciembre	150 000	Aves
28 de diciembre	130 000	Flores
30 de diciembre	65 000	Límite Cretácico-Paleógeno. Extinción de dinosaurios no aviares. Primeros primates
31 de diciem. 14:24	12 300	Homínidos
22:24	2 500	Género *Homo,* herramientas de piedra
23:44	400	Control del fuego
23:48	300	*Homo sapiens* (anatomía de humanos modernos)
23:55	100-60	Conductas de humanos «modernos» que incluyen marcas simbólicas, comercio a gran distancia, herramientas más complejas y asentamientos
23:59:32	12	Agricultura, época del Holoceno
23:59:48	5	Edad del Bronce. Primera dinastía de Egipto
23:59:49	4.5	Invención del alfabeto y la rueda
23:59:53	3	Hierro
23:59:55	2	Imperio Romano. Historia de la cristiandad. Invención del 0
23:59:59	0.5	Choque entre el Viejo Mundo y el Nuevo Mundo

1. Calendario cósmico popularizado por Carl Sagan. El calendario cósmico representa la historia del cosmos, la Tierra, la vida y el ser humano a lo largo de un solo año. Así, por ejemplo, los homínidos aparecen en la Tierra a las 14:24 horas del último día del año (ka = kiloaños o miles de años antes del momento actual).

Una Tierra cambiante

Para la mayoría de especialistas en las ciencias naturales, los seres humanos han sido durante mucho tiempo un actor secundario; los protagonistas principales han sido el mundo natural y sus procesos, desde la física hasta la química y la biología. En comparación con estas «grandes fuerzas de la naturaleza» y sus miles de millones de años de historia ininterrumpida, los seres humanos somos un animal más y unos recién llegados. Pero incluso entre los pensadores científicos de la época de Darwin empezó a surgir otro punto de vista. El ser humano no era un primate más, sino una fuerza sumamente perturbadora, como ninguna otra en la Tierra.

Uno de los defensores más destacados de esta idea fue George Perkins Marsh, cuyo libro *Man and Nature* [«El hombre y la naturaleza»], de 1864; revisado y publicado en 1874 con el título *The Earth as Modified by Human Action* [«La Tierra modificada por la acción humana»], contaba una historia diferente sobre la relación de nuestra especie con el mundo natural. Las antiguas sociedades humanas del Mediterráneo talaron bosques y labraron la tierra para practicar la agricultura y con ello alteraron enormemente la vegetación, los suelos e incluso el clima en grandes territorios y dejaron «la faz de la tierra con una desolación casi tan completa como la de la luna». El ser humano se vio como una fuerza destructiva capaz de alterar la Tierra para mal de un modo permanente. En 1873, el geólogo poco conocido Antonio Stoppani se atrevió a definir un nuevo periodo temporal basándose en esas alteraciones humanas: la «era antropozoica».

A medida que avanzó la era industrial fue creciendo la demanda de recursos del planeta. El alcance, la intensidad y la extensión de las actividades humanas aumentaron de forma espectacular con la quema de combustibles fósiles y la interconexión entre todas ellas mediante redes mundiales de comercio. La tala de bosques, la roturación de los suelos, la minería, la construcción de ciudades y la producción industrial contaminaron cada vez más las aguas, el aire y la tierra, y la transformación generalizada de los espacios naturales en bulliciosos paisajes humanos dejó cada vez menos espacio a los moradores no humanos. Pero la demostración más insólita de

que los humanos se habían convertido en una fuerza capaz de transformar la Tierra surgiría de algo tan insustancial como el aire.

El final de la naturaleza

En 1895 Svante Arrhenius se basó en los trabajos de John Tyndall para demostrar que el dióxido de carbono y el vapor de agua de la atmósfera terrestre atrapan la energía calorífica y crean un «efecto invernadero» que calienta la superficie de la Tierra lo suficiente como para que albergue agua líquida, un requisito indispensable para la vida tal y como la conocemos. Además, planteó que los cambios que han experimentado con el paso del tiempo el dióxido de carbono y otros «gases de efecto invernadero» de la atmósfera servirían para explicar las glaciaciones y otras variaciones a largo plazo de la temperatura de la Tierra. Y también contempló la posibilidad de que la quema de carbón incrementara aún más ese calentamiento derivado del efecto invernadero del planeta. Tal vez fuera algo positivo, pensó él, al menos en lugares fríos como su Suecia natal.

Más de medio siglo después de Arrhenius, los datos confirmaron que el dióxido de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles llenaba, en efecto, la atmósfera de la Tierra y provocaba un aumento de las temperaturas. En 1965, los científicos advirtieron de los peligros del calentamiento global antropogénico en un informe destinado al presidente estadounidense Lyndon Johnson. Los indicios se acumulaban y el pronóstico se tornaba más evidente. Si continuaba la misma tendencia, la Tierra sufriría un calentamiento drástico que tendría enormes consecuencias, tanto para las sociedades humanas como para el mundo natural, en cuestión de unas pocas décadas. El nivel del mar subiría y pondría en peligro las ciudades costeras. Los cambios climáticos alterarían la producción agrícola y desplazarían los hábitats naturales en todo el mundo. El mensaje de la ciencia era claro: la actividad humana estaba conduciendo la Tierra hacia una dirección nueva y posiblemente catastrófica. La comunidad científica hizo un llamamiento para actuar.

En 1988 se creó una nueva institución científica para evaluar los peligros del calentamiento global antropogénico, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). No estaban solos. Un amplio colectivo de activistas, organismos e intelectuales llevaba más de un siglo analizando los diferentes daños ambientales provocados por los humanos. La evidencia de que la humanidad está alterando las condiciones más esenciales

para la vida de la Tierra se convirtió en su grito de guerra. El calentamiento global antropogénico lo estaba transformando todo. Para algunos, había llegado el momento de reescribir la historia de los humanos y la naturaleza.

En 1989 el periodista Bill McKibben publicó *The End of Nature* [«El fin de la naturaleza»], el primer libro divulgativo sobre el cambio climático. Para McKibben, la destrucción causada por los humanos en los entornos naturales había alcanzado la cumbre. Las sociedades modernas ya habían alterado, domesticado y controlado el mundo como nunca antes, contaminando y degradando el agua, el suelo, el aire y la propia naturaleza de la vida. Con la transformación del sistema climático, los humanos habían dado el último paso. La naturaleza que permanecía intacta por el ser humano había desaparecido ahora por el alcance a escala mundial de un clima alterado por la humanidad.

Un capítulo nuevo

Tal vez sea excesivo interpretar el cambio climático antropogénico como el «fin de la naturaleza». ¿Cómo podría un producto de la naturaleza (un mono desnudo) adquirir la capacidad de acabar con la propia naturaleza? Y si la naturaleza ha llegado a su fin, ¿qué hay ahora? Pero los datos científicos son claros. En efecto, los seres humanos están alterando la Tierra de un modo insólito. Hay buenas razones para admitir que podríamos estar viviendo un capítulo nuevo de la historia de la Tierra en el que la humanidad asume el protagonismo.

Por eso ha llamado tanto la atención el Antropoceno. Atribuir a los seres humanos el papel de configuradores de la Tierra es revisar las narrativas científicas desarrolladas desde Copérnico sobre el ser humano y la naturaleza. Y la controversia siempre ha acompañado a cualquier intento de reescribir la historia de la Tierra, la vida y la humanidad. Aunque los geólogos siguen siendo los guardianes del tiempo de la historia terrestre desde hace más de dos siglos, la narrativa científica del Antropoceno está abriendo nuevas sendas. Habrá que formular interrogantes de otro tipo y que aportar datos nuevos para asignar al ser humano el papel de iniciador de un nuevo intervalo de la historia de la Tierra.

A ninguna otra especie se le atribuye un intervalo de tiempo geológico propio. ¿Por qué la nuestra es la única que adquirió la capacidad de transformar todo un planeta? ¿Cuándo comenzó esta capacidad y por qué mecanismo? ¿Forman parte por igual todos los seres humanos de esta

transformación? ¿Qué pruebas son necesarias para responder estas preguntas? Y, en términos más generales, ¿qué significa ser humano cuando se forma parte de una fuerza global que lo cambia todo, incluso el futuro de un planeta entero? ¿Qué significa lo natural en una era del ser humano?

Para responder estas cuestiones es necesario tener una idea básica sobre los procesos del sistema terrestre y sobre los cambios que ha inducido en ellos el ser humano y que han inspirado la propuesta del Antropoceno. También es indispensable entender las herramientas, los procedimientos y los marcos de referencia del tiempo geológico para datar estos cambios y poder insertarlos dentro del calendario formal de la historia de la Tierra. A partir de esta base, examinaremos toda la variedad de propuestas para fechar el inicio del Antropoceno, desde las pruebas nucleares de los años 50 hasta los comienzos de la agricultura, los orígenes del ser humano como especie y antes. A continuación, analizaremos las múltiples formas en que la propuesta del Antropoceno está reconfigurando las ciencias, estimulando las humanidades y poniendo en primer plano la política de la vida en un planeta transformado por los humanos.

2. El sistema Tierra

«¿Está sobrepasando el ser humano en la actualidad a las grandes fuerzas de la naturaleza?», se plantearon Will Steffen, Paul Crutzen y el historiador John McNeill en su clásico artículo de 2007 sobre el Antropoceno. Era una pregunta retórica. Para estos autores, la respuesta solo podía ser un rotundo sí.

Puede que algunas personas consideren grandilocuente y hasta herético lanzar semejante afirmación. Pero para Steffen, Crutzen y otros especialistas en el sistema Tierra, esta cuestión había sido objeto de décadas de investigación. En su opinión, las «grandes fuerzas de la naturaleza» no son poderes divinos, sino los procesos en los que se basa el funcionamiento de la Tierra como sistema dinámico complejo.

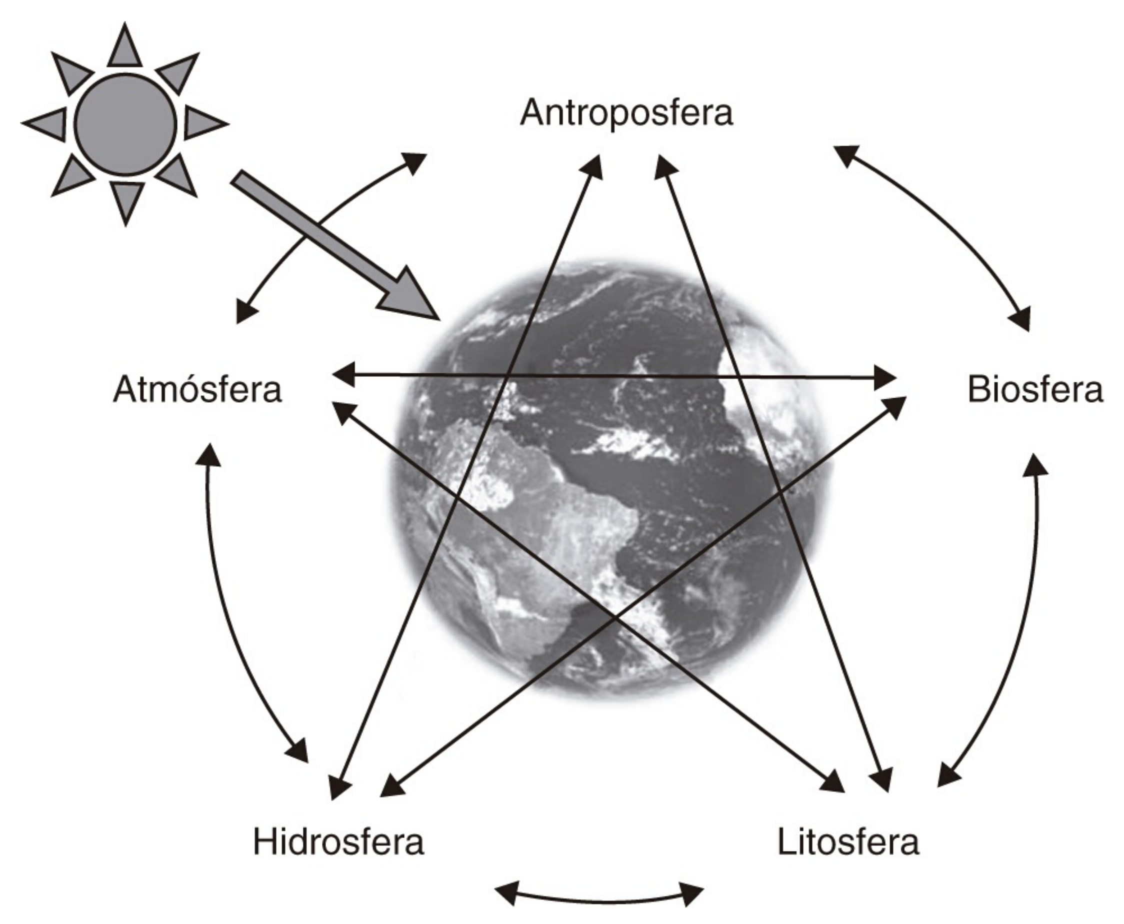
Es muy lógico que la propuesta del Antropoceno partiera de científicos centrados en entender la Tierra de esta manera. Para confirmar que la especie humana ha trastocado el funcionamiento de la Tierra como sistema, hay que demostrar los mecanismos causales que subyacen a estas alteraciones. Sin una comprensión firme de la Tierra como sistema (sus elementos esenciales, sus interacciones y, sobre todo, los procesos que mantienen el sistema terrestre estable o introducen cambios) no se pueden establecer las causas de las variaciones en el sistema terrestre.

Esferas y ciclos

Los primeros pasos para crear una ciencia del sistema terrestre procedieron de un geólogo, Eduard Suess, que introdujo los términos litosfera, hidrosfera y biosfera en su popular libro de texto de 1875 titulado *Das Antlitz Der Erde* [«La faz de la Tierra»]. Partiendo de los términos de Suess, Vladímir Vernadski desarrolló el primer modelo científico moderno de la Tierra como un sistema complejo basado en interacciones dinámicas entre las «esferas», en su libro de 1926 titulado *La biosfera*[2] (figura 2).

Vernadski caracterizó el funcionamiento de la Tierra a partir de los intercambios de energía y materia entre las esferas, a la vez que todo este sistema de interacciones se alimenta con la energía del Sol. Según él, la

biosfera es crucial para estas interacciones, ya que actúa como una fina «envoltura» que regula y refuerza estos intercambios de energía y materia entre la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera terrestres. Tomando energía del Sol y dióxido de carbono del aire, los organismos fotosintéticos adquirieron la capacidad de alterar los ciclos globales del carbono y otros elementos entre las esferas. Y mediante la regulación de las concentraciones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero de la atmósfera, la biosfera transformó de forma permanente la dinámica del sistema climático de la Tierra. Aunque Vernadski se considera ahora el primer científico que propuso que el funcionamiento de la Tierra como un sistema se vio alterado con la aparición de la biosfera, su trabajo no trascendió mucho fuera de la Unión Soviética en aquella época.



2. Esferas del sistema Tierra, incluida una «antroposfera» que representa los efectos globales interactivos de las actividades humanas.

El renacer de Gaia

A mediados de la década de 1960, Carl Sagan y otros astrofísicos se toparon con un problema. Se sabía que la Tierra había mantenido un clima muy estable durante los últimos 4000 millones de años. Sin embargo, la producción energética del Sol había aumentado un 30 % durante ese período. Desde el principio, gracias a las altas concentraciones de dióxido de carbono que había en la atmósfera, la Tierra ya era lo bastante cálida para albergar agua líquida en la superficie y contaba con otras condiciones necesarias para la vida. Entonces, ¿por qué el planeta no sufrió un calentamiento considerable con el aumento de la energía solar? Si no existiera ningún mecanismo regulador, la Tierra habría alcanzado temperaturas excesivas para la vida a medida que el Sol se fue calentando.

A comienzos de los años 70, James Lovelock y Lynn Margulis encontraron una respuesta. Fueron los organismos vivos, actuando colectivamente como biosfera, los que regularon el clima de la Tierra y mantuvieron las condiciones necesarias para la vida. La vida alumbró a la propia vida. Gaia renació con la hipótesis crucial que desencadenó la aparición de la ciencia del sistema Tierra.

La hipótesis de Gaia sostiene que la biosfera regula el clima de la Tierra actuando como un termostato. Cuando la Tierra se calienta, la biosfera responde con efectos enfriadores. Por ejemplo, los organismos captan más gases de efecto invernadero de la atmósfera y liberan partículas finas (aerosoles) en el aire, lo que favorece la formación de nubes que reflejan hacia fuera la energía del Sol. Cuando la Tierra se enfría, la biosfera produce efectos opuestos que calientan el planeta y contrarrestan el descenso de las temperaturas, mediante el aumento de los gases de efecto invernadero y la reducción de los aerosoles en la atmósfera. Por tanto, es posible que la biosfera estabilizara la temperatura de la Tierra a través de un sistema de «retroacción negativa» que contrarrestara el calentamiento derivado del aumento de la energía solar, un proceso externo a la Tierra. Es posible que las retroacciones negativas también equilibren los efectos calentadores y enfriadores debidos a procesos internos del sistema terrestre, como la liberación de gases de efecto invernadero y aerosoles por parte de los volcanes.

El sistema Tierra también está repleto de sistemas de retroacción positiva, como los controlados por la cubierta de hielo planetaria (la criosfera) cuando el Sol derrite el hielo del Ártico. El agua marina expuesta al Sol es una captadora excelente de la energía solar. El hielo que flota en el mar refleja la mayoría de esta energía hacia el espacio. Cuando el Sol funde el hielo del

Ártico, deja expuesta más cantidad de agua marina que absorbe la luz del Sol, por lo que se absorbe aún más calor. En consecuencia, se derrite más hielo, y el calentamiento aumenta. Por tanto, la fusión del hielo marino es un bucle de retroacción positiva, en el que el calentamiento genera un calentamiento aún mayor, lo que acelera la fusión del hielo ártico con el Sol. En algún momento, este sistema de retroacción positiva puede llegar a un punto de no retorno (un «punto crítico» o «cambio de régimen») a partir del cual el hielo ártico seguirá fundiéndose hasta desaparecer por completo.

Dado el espectacular aumento que experimentó la energía del Sol a largo plazo, el sistema Tierra no podría mantener la vida si no hubiera reaccionado al calentamiento del Sol. Fue necesaria alguna forma de regulación. Para entender la notable estabilidad de la Tierra a largo plazo y su capacidad para sostener la vida, debemos contemplarla como el resultado de un complejo sistema de retroacciones positivas y negativas que interaccionan y determinan los flujos de materia y energía entre las esferas.

La hipótesis Gaia de Lovelock dio lugar a un libro muy popular y a una forma totalmente nueva de concebir la vida en la Tierra. Aunque el mecanismo biosférico que proponía para regular el clima a largo plazo ha sido desplazado en buena medida por un mecanismo geoquímico, su aportación más importante tal vez consista en el esquema subyacente que describe el funcionamiento de la Tierra como un sistema complejo y dinámico estabilizado por las retroacciones entre las diferentes esferas. Con la hipótesis de Gaia, la estabilidad climática frente al calentamiento del Sol y otros comportamientos autorreguladores pasaron a interpretarse como procesos complejos al nivel del sistema global, que emergen de las interacciones entre los subsistemas que componen la Tierra: emerge así un todo que es más que la suma de sus partes. La hipótesis de Gaia de Lovelock y Margulis sentó las bases de la ciencia del sistema Tierra con la introducción de un enfoque sistémico para entender la dinámica de la Tierra a largo plazo, incluyendo el concepto de biosfera dinámica y la necesidad de emplear modelos computacionales para incorporar las interacciones dinámicas entre las esferas de la Tierra.

La gran oxigenación

La relevancia de la biosfera en el funcionamiento de la Tierra ejemplifica lo que significa ser una gran fuerza de la naturaleza. Los científicos llevan mucho tiempo considerando la Tierra como un planeta dinámico, al menos

desde los trabajos de James Hutton a finales del siglo XVIII. Pero la transformación de la Tierra por parte de la biosfera confiere un sentido totalmente novedoso al concepto de planeta dinámico. La vida no solo alumbró a la propia vida, sino que los organismos vivos también dieron lugar a la atmósfera de oxígeno de la Tierra.

La vida parece haber comenzado en el mar con la aparición de células individuales, unos mil millones de años después de que la Tierra se solidificara como planeta. Al igual que en Venus y Marte, la composición de la atmósfera terrestre primordial consistía sobre todo en dióxido de carbono (CO_2). Al no existir una atmósfera de oxígeno (O_2), tampoco había una capa de gas ozono (O_3) derivada de este O_2 capaz de absorber la radiación ultravioleta del Sol que destruye la vida, lo que inhibía la aparición de seres vivos en tierra firme.

Tendrían que transcurrir otros mil millones de años antes de que la situación empezara a cambiar con el surgimiento de organismos capaces de alimentarse con el Sol. Las células con esta nueva capacidad biológica, la fotosíntesis, utilizaban la energía del Sol para transformar el CO_2 y el agua en azúcares y, en última instancia, en todos los demás compuestos orgánicos ricos en carbono necesarios para la vida. Como resultado, se produjo un nuevo e ingente aporte energético que sustentó y potenció el crecimiento y el desarrollo de la biosfera. Y la atmósfera de la Tierra cambió para siempre por la acumulación de su principal producto de desecho: el gas O_2.

La fotosíntesis lo cambió todo. Durante cientos de millones de años, los organismos fotosintéticos, en su mayoría bacterias, llenaron la atmósfera terrestre de O_2. Este episodio de «gran oxigenación» ocurrió en un principio de un modo muy lento, ya que el primer O_2 disponible reaccionaba con el hierro y otros minerales de los océanos y la corteza terrestre, y dio lugar a inmensos depósitos de hierro oxidado y otros compuestos. Pero una vez oxidados todos estos minerales, el O_2 empezó a acumularse con rapidez en la atmósfera. Se produjo un descenso drástico de los niveles de CO_2 atmosférico, el cual quedó atrapado primero en los cuerpos ricos en carbono de los organismos vivos, y después secuestrado en los sedimentos de las profundidades del océano al hundirse sus cuerpos muertos, donde se acumularon y con el tiempo acabaron formando rocas. Los organismos incapaces de vivir expuestos al gas O_2, altamente reactivo, se extinguieron o se retiraron a los nichos menos oxigenados del planeta.

La química de la Tierra experimentó una alteración radical debido al oxígeno libre de la atmósfera. Durante una segunda oleada de oxigenación

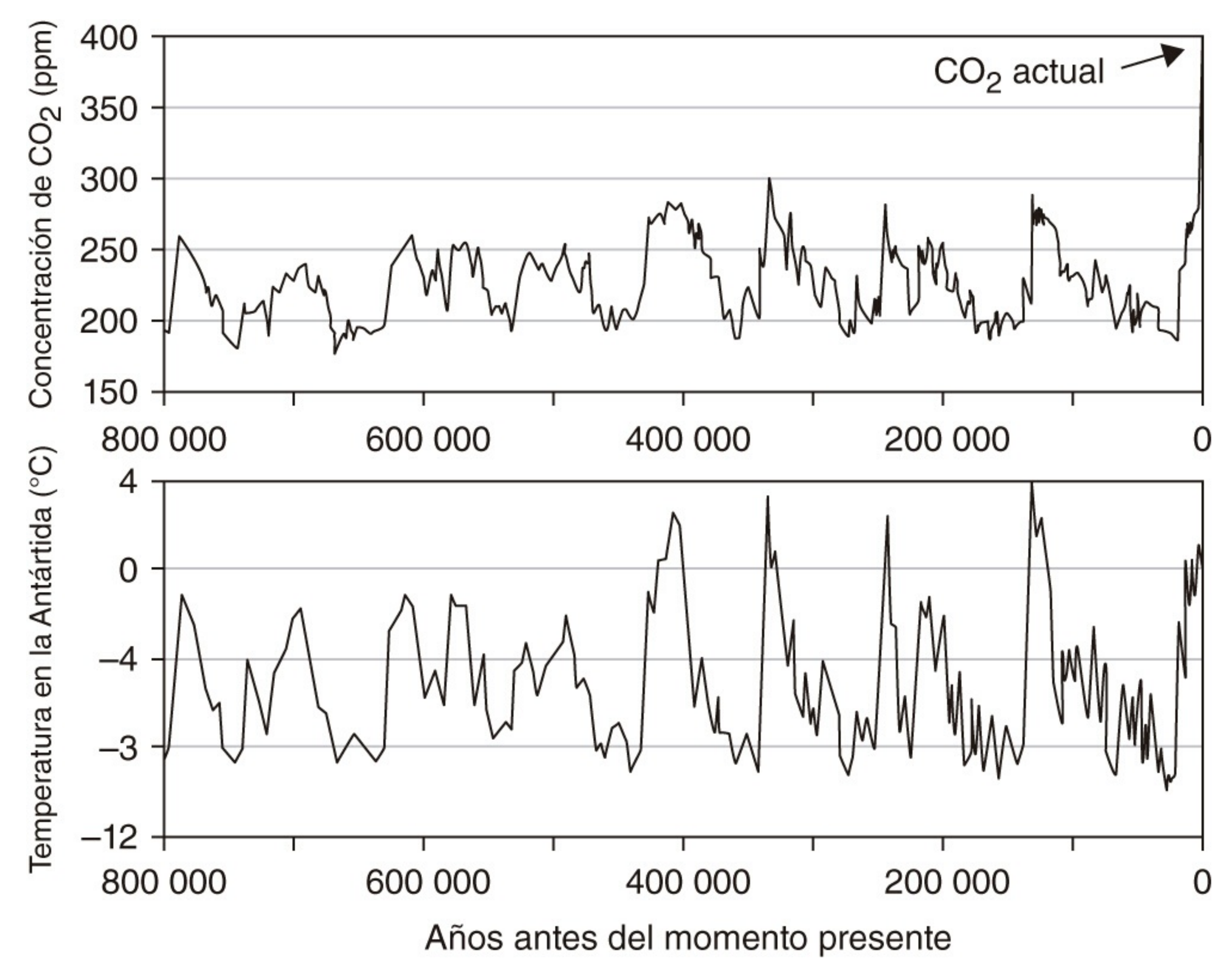
asociada al surgimiento de las plantas terrestres se alcanzaron niveles de oxígeno similares a los actuales, hace unos 400 millones de años. La nueva química del oxígeno disolvía rocas, creaba minerales nuevos y permitía la rápida liberación de la energía almacenada en compuestos orgánicos, lo que condujo a que prendieran incendios y desbloqueó nuevas variedades metabólicas de alta energía, como la respiración aeróbica, lo que reforzó enormemente la capacidad de los organismos pluricelulares complejos para perdurar. Con ello, la biosfera contribuyó a crear las condiciones necesarias para la proliferación de organismos pluricelulares complejos y facilitó la aparición de la vida en los continentes, amparada por una capa de ozono protectora en la estratosfera. Y al favorecer la eliminación y el confinamiento del CO_2, la atmósfera y la dinámica climática del planeta experimentaron una transformación permanente que redujo en gran medida el efecto invernadero que aún mantiene la superficie de Venus a una temperatura suficiente para fundir el plomo. La emergencia de la vida alteró para siempre la química y la física de la Tierra.

El carbono y el clima

La biosfera sigue siendo hoy en día un agente activo del sistema Tierra que reacciona frente a los cambios que se producen a largo plazo en la energía solar incidente alterando las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. A lo largo de la historia del planeta, la energía solar incidente ha aumentado y disminuido debido a las variaciones cíclicas de la distancia y la orientación de la Tierra respecto del Sol, lo que ha desencadenado amplias glaciaciones en distintos momentos. En los últimos 2.6 millones de años, la Tierra ha experimentado numerosos ciclos de intervalos de frío glacial o glaciaciones (durante los cuales los glaciares y el hielo marino se fueron extendiendo hasta el resto de zonas desde los polos) intercalados con periodos interglaciales bastante cálidos, durante los cuales el hielo retrocede.

Mediante la toma de muestras a gran profundidad en la Antártida y Groenlandia, los climatólogos han reconstruido estos ciclos antiguos de la temperatura terrestre y del dióxido de carbono atmosférico realizando mediciones en las diferentes capas de hielo que se han ido depositando a lo largo de cientos de miles de años (figura 3). A través de los numerosos ciclos glaciales e interglaciales que atraviesa el planeta, el dióxido de carbono atmosférico aumenta y disminuye en sincronía con el calentamiento y el

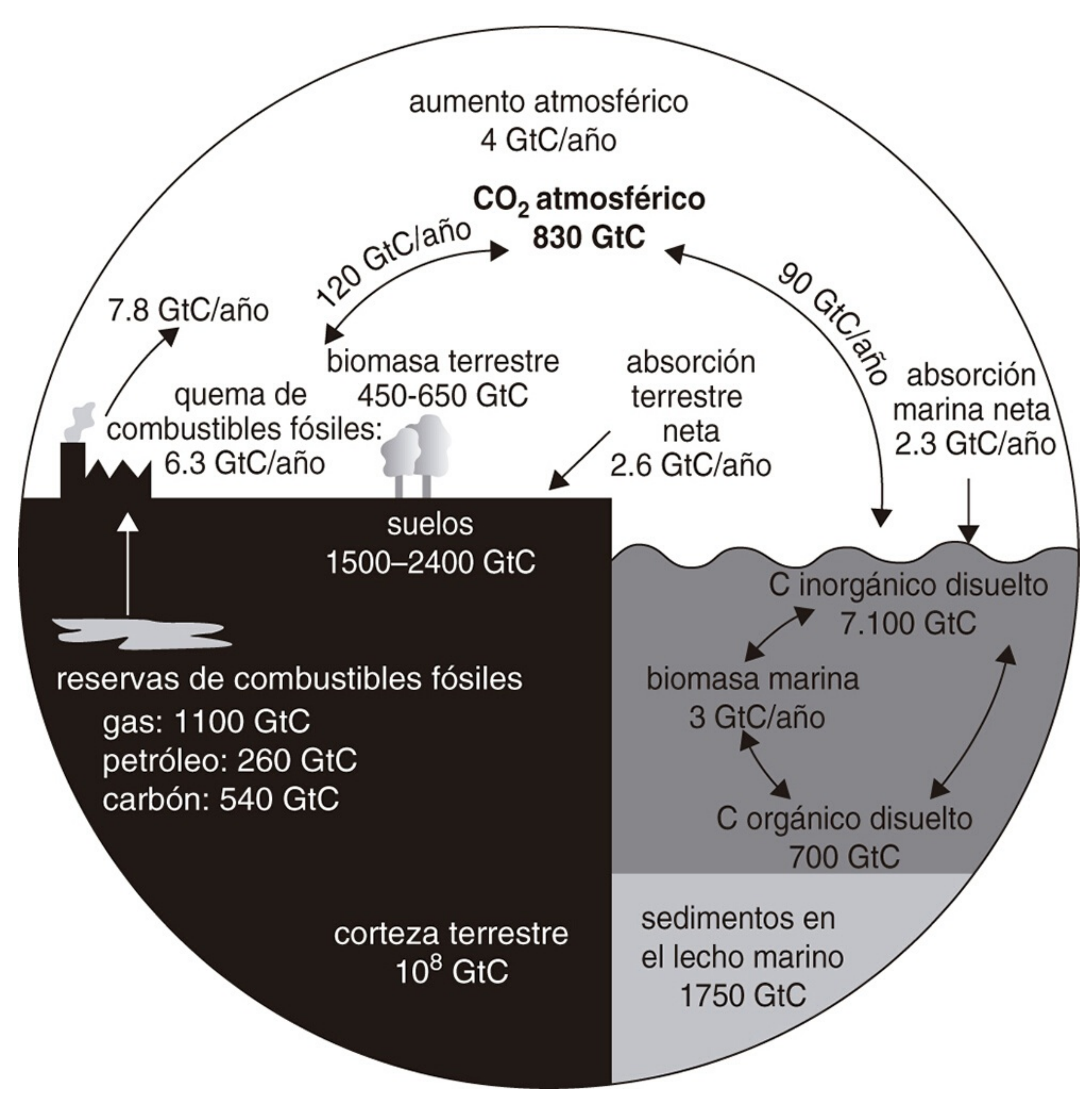
enfriamiento de la Tierra, en parte como resultado de la respuesta activa de la biosfera y, en parte, como respuesta a la acumulación de carbono en los océanos terrestres. Mediante la liberación de carbono cuando la Tierra se calienta y la reabsorción del mismo cuando el planeta se enfría, la biosfera ha reaccionado frente a los cambios cíclicos que ha experimentado a largo plazo la energía solar incidente y el calor amplificando esos efectos, creando un sistema de retroacción positiva que ha reforzado la dinámica climática de la Tierra durante más de un millón de años.



3. Variaciones del dióxido de carbono y del clima durante los últimos 800 000 años de acuerdo con los registros encontrados en testigos de hielo de la Antártida, que ilustran la correlación entre ambos a lo largo de los ciclos glaciales e interglaciales.

Aunque la energía del Sol y el clima de la Tierra se han mantenido bastante estables durante el intervalo interglacial cálido de los últimos 11 000 años, la biosfera continúa regulando la dinámica del dióxido de carbono en la atmósfera a lo largo de las estaciones del año. Cada primavera, la biosfera absorbe más carbono, lo que reduce el dióxido de carbono en la atmósfera, en respuesta al calentamiento solar que experimenta el hemisferio norte del

planeta (donde se encuentra en la actualidad la mayor parte de las masas continentales y de la fotosíntesis terrestre). A medida que el hemisferio norte se enfría cada otoño, la fotosíntesis se frena y, al mismo tiempo, se libera el carbono de la vegetación, los suelos y los animales en descomposición. Estos ciclos anuales de captación y liberación de carbono forman parte del ciclo global del carbono que se da entre la biosfera, la atmósfera y las demás esferas del sistema Tierra, lo que da lugar al ciclo global biogeoquímico del carbono, el segundo ciclo global más importante de un elemento entre todas las esferas (el primero es el ciclo del oxígeno, que es más masivo; figura 4). Al analizar la dinámica a largo plazo del ciclo del carbono utilizando las herramientas de la ciencia del sistema Tierra, las observaciones sobre el carbono y la temperatura atmosféricos revelan retroacciones sistemáticas entre la biosfera, la litosfera y la atmósfera que generan tanto estabilidad como inestabilidad ante los cambios en la entrada de energía solar y otros impulsores dinámicos de cambios en el sistema Tierra.



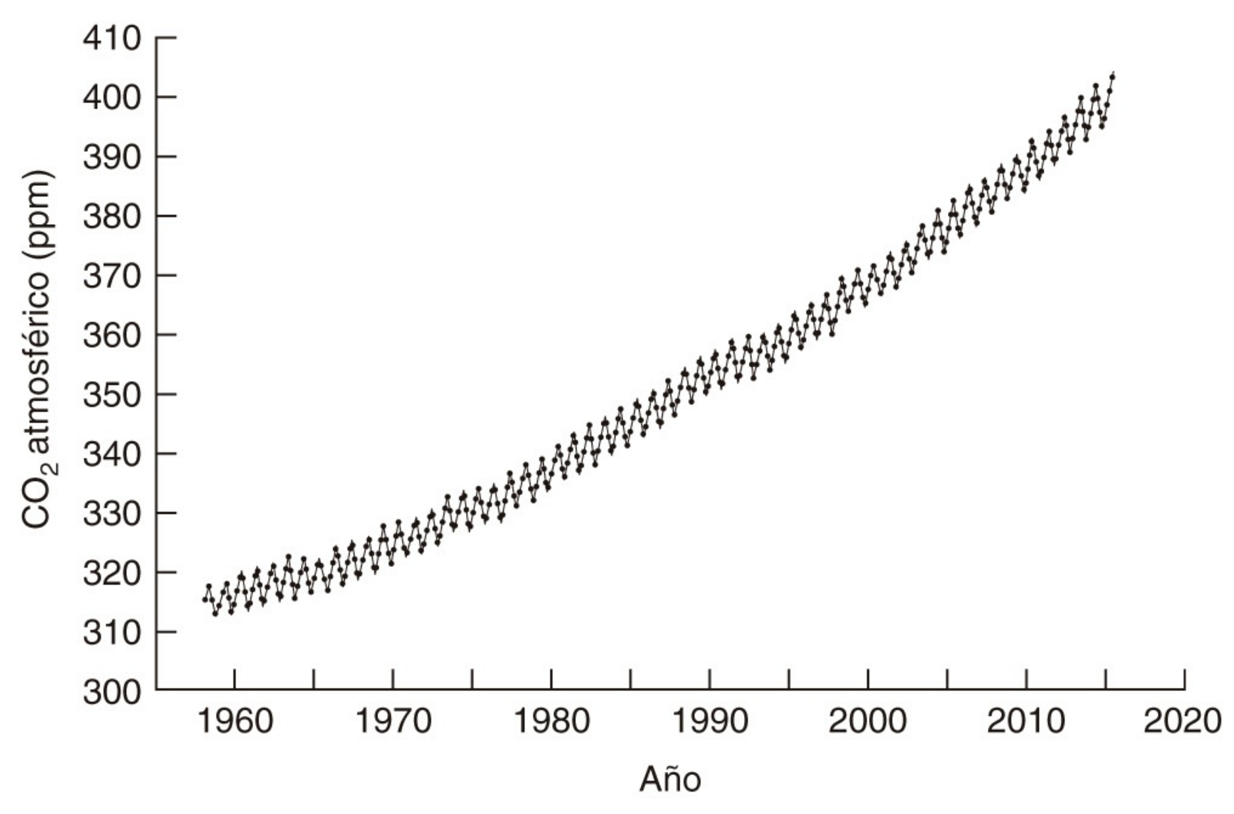
4. El ciclo global del carbono, medido en gigatoneladas de carbono (GtC).

La curva de Keeling

En marzo de 1958 Charles David Keeling recibió financiación del Año Geofísico Internacional para instalar un analizador de gases de luz infrarroja en la cima del volcán inactivo Mauna Loa de Hawái. Con ello pretendía medir el dióxido de carbono en un lugar remoto e inalterado del planeta donde las concentraciones se asemejaran a las que se dan en las condiciones bien mezcladas de la atmósfera terrestre en su conjunto. Keeling, por entonces un joven científico postdoctoral, no tardaría en escribir sobre su primer descubrimiento: «La constatación por primera vez de que la naturaleza

elimina CO_2 del aire para favorecer el crecimiento de las plantas durante el verano y lo repone al invierno siguiente». Keeling había observado que la biosfera «respira».

A pesar de este primer logro, la mayor aportación de Keeling requirió varios años más de cuidadosas mediciones. En lo que ahora se conoce como curva de Keeling, sus mediciones a largo plazo revelaron una tendencia sorprendente que predominaba sobre los ciclos estacionales de la biosfera terrestre (figura 5). Con el paso de los años, las concentraciones de dióxido de carbono mostraban una clara tendencia al alza. Keeling publicó sus resultados en 1960 y con ello aportó la primera prueba sólida de que la quema masiva de combustibles fósiles estaba provocando la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre. En la década de 1970, esta tendencia ascendente continuada llamó cada vez más la atención de los especialistas en ciencias de la Tierra.



5. La curva de Keeling. Las reiteradas mediciones del CO_2 atmosférico que efectuó Charles David Keeling en Mauna Loa (Hawái) demostraron por primera vez que las concentraciones de CO_2 estaban creciendo a escala planetaria con el paso del tiempo.

La curva de Keeling evidenciaba que el empleo de combustibles fósiles por parte del ser humano estaba alterando con rapidez la atmósfera de la Tierra y tenía la capacidad de trastocar también el funcionamiento del sistema Tierra en su conjunto. Y las observaciones atmosféricas solo fueron el

principio. Para entender las causas y las consecuencias de la evolución del dióxido de carbono atmosférico habría que tener en cuenta los flujos y los ciclos del carbono que entran y salen de los numerosos depósitos de carbono que alberga el planeta, incluyendo no solo la vegetación y los suelos de la biosfera terrestre, así como los cambios provocados por la humanidad en ellos, sino también los océanos del planeta y hasta las emisiones volcánicas, todo ello junto con las emisiones de las sociedades humanas debidas a la quema de combustibles fósiles y la producción de acero y cemento. Se necesitaría una colaboración científica internacional sin precedentes para analizar juntos todos estos elementos del ciclo global del carbono. Los trabajos que confirmaron que las sociedades humanas estaban alterando la atmósfera terrestre y, en última instancia, el clima del planeta fomentaron con rapidez el surgimiento de una comunidad más amplia de especialistas en el sistema Tierra.

El agujero de la capa de ozono

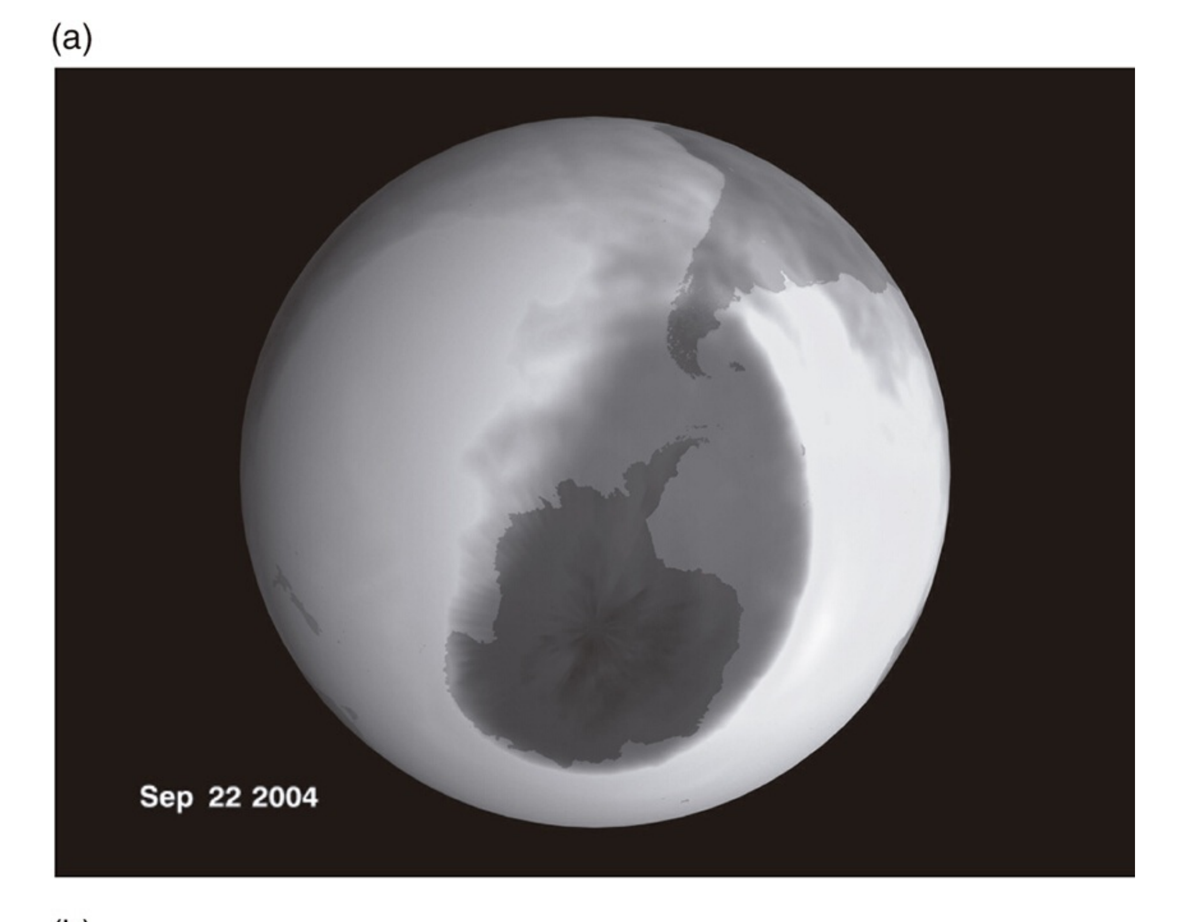
En un artículo publicado en 1970, el químico atmosférico Paul Crutzen planteó que la capa de ozono que protege la Tierra podría estar amenazada por las emisiones de un gas estable no tóxico que producen de forma natural las bacterias que viven en los suelos. Al ascender hasta los niveles superiores de la atmósfera terrestre, el gas óxido nitroso (N_2O; también conocido como «gas de la risa») pasaría a descomponerse con la severa radiación ultravioleta de la estratosfera, y entonces reaccionaría con la capa de ozono y la dañaría. Si menguaba la capa de ozono, la vida de la Tierra quedaría expuesta a la dañina radiación ultravioleta. Era posible que el uso intensivo de fertilizantes ricos en nitrógeno incrementara esas emisiones y sus consecuencias perjudiciales. En aquel momento, el trabajo de Crutzen despertó poco interés.

Unos años más tarde, en 1974, Frank Sherwood Rowland y Mario Molina plantearon la hipótesis de que otro tipo de gases inertes, los clorofluorocarbonos (CFC), también estuvieran llegando a la estratosfera y destruyendo el ozono. A diferencia del óxido nitroso, los CFC son una sustancia química artificial, producida por la industria para usarla en refrigeradores, aparatos de aire acondicionado y hasta botes de aerosoles. La hipótesis Rowland-Molina causó un gran revuelo en los sectores industriales que fabricaban y utilizaban CFC, al mismo tiempo que se acumulaban pruebas de que el ozono estratosférico estaba verdaderamente amenazado.

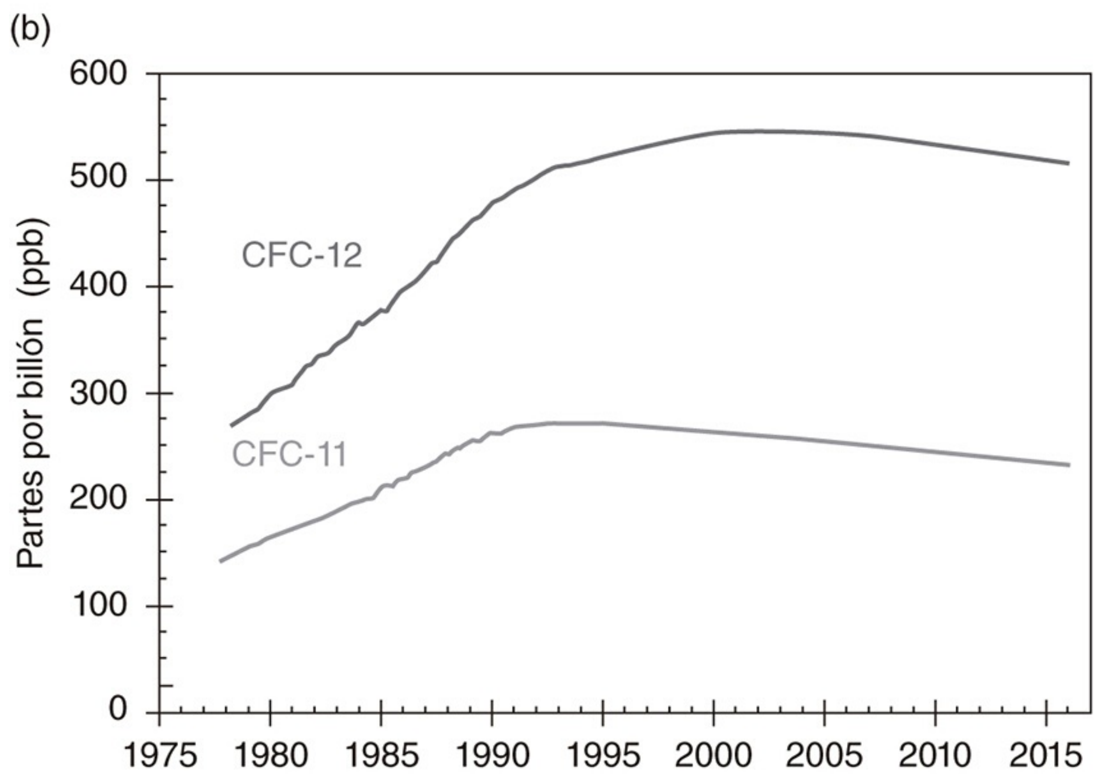
Hubo que esperar a 1985 para que se hiciera patente la consecuencia más grave de la degradación del ozono en forma de un agujero en la capa de ozono situada sobre la Antártida, donde las acumulaciones estacionales de CFC provocaron una pérdida casi total del ozono (figura 6). El descubrimiento del agujero de ozono despertó de inmediato una gran preocupación no solo entre la comunidad científica, sino también entre la población general y los responsables políticos. En pocos años, un esfuerzo internacional coordinado introdujo nuevas bases políticas para resolver el problema del ozono, empezando por el Protocolo de Montreal.

El Protocolo de Montreal y posteriores medidas más estrictas acabarían reduciendo y eliminando la producción y el empleo de CFC, lo que permitió recuperar la capa de ozono. Crutzen, Rowland y Molina compartieron el Premio Nobel de Química de 1995. Y con todo ello arraigó la idea de que la alteración de la atmósfera por parte del ser humano estaba teniendo graves implicaciones, lo que alentó la demanda de más esfuerzos internacionales para detectar, desentrañar y, a ser posible, evitar las consecuencias dañinas de la alteración humana del sistema Tierra.

(a)



(b)



6. Agujero en la capa de ozono sobre la Antártida, y variaciones con el paso del tiempo en los CFC atmosféricos.

El Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP)

En 1972, la Organización de las Naciones Unidas celebró su primera conferencia sobre el «medio ambiente humano» y de ella salió el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Los esfuerzos para frenar el deterioro ambiental contaron con el apoyo creciente de una serie de organismos gubernamentales que respaldaron de forma activa la investigación y las políticas destinadas a dilucidar y abordar los problemas medioambientales.

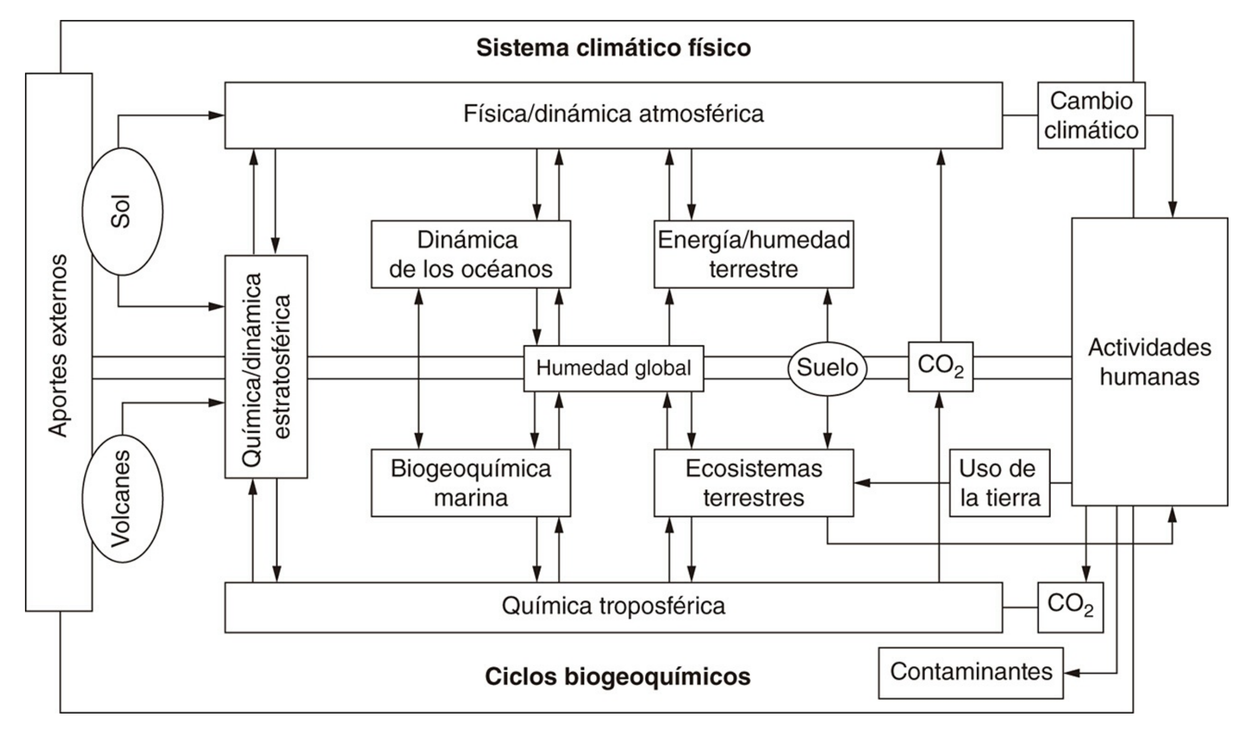
Tal como documentó Rachel Carson en su influyente libro *Primavera silenciosa*[3], los productos químicos artificiales, como el DDT, estaban dañando la reproducción de las aves y otros animales en emplazamientos alejados de los lugares donde se aplicaban. La agricultura, el pastoreo y la expansión de las zonas urbanas estaban desplazando y dañando con rapidez los hábitats naturales. La lluvia ácida debida a las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) de la quema de carbón en una región determinada podía viajar cientos de kilómetros antes de caer en otra zona e incluso otro país y dañar los bosques y las masas de agua dulce de ese lugar. En la década de 1980 quedó patente que muchos problemas medioambientales afectaban a una escala cada vez más global. Era necesaria una ciencia ambiental planetaria para entender y resolver estos contratiempos.

La preocupación por el agujero de la capa de ozono se sumó a esta extensa variedad de desafíos ambientales para reclamar una ciencia más sólida del cambio medioambiental global. Esta labor se encomendó a organizaciones científicas internacionales de nueva creación dedicadas al estudio del cambio medioambiental global basándose en colaboraciones previas de investigación de ámbito planetario, como el Año Geofísico Internacional. La primera fue el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, de 1979. En 1986, un informe de la NASA muy difundido pidió aumentar

> la comprensión científica de todo el sistema Tierra a escala global describiendo cómo han evolucionado sus partes integrantes y las interacciones entre ellas, cómo funcionan y cómo es de esperar que continúen evolucionando a todas las escalas temporales.

El informe incluía un modelo conceptual del sistema Tierra que contemplaba la incidencia de las «actividades humanas» (figura 7). Sería necesario crear una institución científica internacional para respaldar la iniciativa.

En 1987, Paul Crutzen y Will Steffen fueron de los primeros en unirse al recién creado Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP). Con la aparición del IGBP, con sede en Suecia, la ciencia del sistema Tierra adquirió el peso institucional necesario para fundar una comunidad sólida e interdisciplinar de científicos dedicados a hacer avanzar este campo de estudio.



7. Modelo del sistema Tierra introducido en un informe de la NASA de 1986. El funcionamiento de los distintos subsistemas de la Tierra se relaciona con las diferentes «actividades humanas», como el uso del suelo, la contaminación y las emisiones de CO_2.

Cambiar el sistema

A mediados de la década de 1990, los científicos del sistema Tierra, coordinados por el IGBP y otras instituciones científicas internacionales, habían reunido una serie contundente de pruebas que demostraban que el ser humano estaba alterando drásticamente el funcionamiento de la Tierra como sistema. Las actividades humanas no solo estaban llenando la atmósfera de dióxido de carbono, CFC, aerosoles y otros gases traza, sino que estaban poniendo en peligro la capa de ozono protectora e induciendo cambios globales en el clima. Estaban alterando el ciclo planetario de los elementos, los ciclos biogeoquímicos de la Tierra, y no solo el ciclo del carbono, sino también los ciclos del nitrógeno y otros elementos dadores de vida. El empleo

humano del territorio estaba remodelando la ecología del planeta, erosionando los suelos productivos, desviando el agua hacia las granjas y las ciudades, destruyendo hábitats naturales y provocando la extinción de especies a un ritmo alarmante.

Las observaciones evidenciaban con claridad que la actividad humana estaba cambiando a la par que la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera, la biosfera y el clima de la Tierra. En la década de 1990 los avances tecnológicos permitieron ir más allá de la observación. El empleo de simulaciones por ordenador de los intercambios de materia y energía entre las esferas permitió confirmar que el aumento de la actividad humana se relaciona de manera causal, y no mediante una mera correlación, con alteraciones sustanciales a largo plazo en el funcionamiento de la Tierra como sistema. No fue un logro menor. Dada la imposibilidad de realizar experimentos en la Tierra, puesto que solo hay una, la aparición de esta herramienta para simular los procesos del sistema Tierra supuso un gran avance científico. En palabras de Hans Joachim Schellnhuber en su innovador artículo de 1999 publicado en *Nature*, el desarrollo de modelos del sistema Tierra combinado con observaciones a escala mundial desde el espacio por teledetección y con las redes de observación global en tierra y mar, representó una «segunda revolución copernicana» destinada a «desentrañar los misterios de la física de la Tierra o el "cuerpo de Gaia"».

En 2001, el IGBP celebró en Ámsterdam una reunión crucial con más de 1400 representantes de la ciencia, la política, la gestión de recursos y los medios de comunicación. El encuentro se centró en la necesidad de estudiar la Tierra como un sistema y de él salió la «Declaración de Ámsterdam sobre el Cambio Global» con las siguientes observaciones:

> El Sistema Tierra se comporta como un sistema único y autorregulado formado por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos.

Y

> Los cambios antropogénicos en la superficie terrestre, los océanos, las costas y la atmósfera de la Tierra, así como en la diversidad biológica, el ciclo del agua y los ciclos biogeoquímicos se detectan con claridad al margen de la variabilidad natural. Son iguales a algunas de las grandes fuerzas de la naturaleza en cuanto a su alcance e impacto. Muchos de ellos se están acelerando. El cambio global es real y está ocurriendo ahora.

La ciencia del sistema Tierra continúa investigando las causas de los cambios dinámicos en el funcionamiento de la Tierra. Tal vez lo más estudiado sea la afirmación de que los seres humanos están «sobrepasando las

grandes fuerzas de la naturaleza», algo respaldado ahora por pruebas concluyentes de que la humanidad está provocando alteraciones sin precedentes en el funcionamiento de la Tierra como sistema. Además, estos cambios antropogénicos tienen la capacidad de producir consecuencias aún más rápidas, sorprendentes y hasta catastróficas como resultado de los puntos críticos y otras retroacciones complejas dentro del sistema Tierra.

No debería sorprendernos que la propuesta espontánea por parte de Paul Crutzen de un nuevo intervalo de la historia de la Tierra emergiera durante la reunión que mantuvo el IGBP en 2000 en México (Crutzen era por entonces vicepresidente del IGBP). Pero el gran conjunto de pruebas reunido por la ciencia del sistema Tierra no basta por sí solo para modificar la escala del tiempo geológico, la ordenación formal en eones, eras, periodos y épocas geológicos de los 4600 millones de años que conforman la historia de la Tierra derivada del consenso internacional. Para introducir un nuevo intervalo de tiempo geológico habría que aplicar los métodos, procedimientos y pruebas científicas de la geología. Sería indispensable demostrar que el ser humano ha dejado una huella clara e identificable a escala mundial en las rocas del planeta.

3. El tiempo geológico

Ocho años después del exabrupto de Crutzen, la comunidad de geólogos estuvo en condiciones de actuar. En el artículo de 2008 titulado «Are we now living in the Anthropocene?» [«¿Estamos viviendo en el Antropoceno?»], Jan Zalasiewicz y sus compañeros de la Sociedad Geológica de Londres instaron a sus iguales a considerar el Antropoceno como un nuevo intervalo de tiempo geológico.

Existían pruebas científicas abrumadoras que ya demostraban que los humanos habían alterado la Tierra. Por eso puede parecer extraño que esto no se haya reconocido aún en la línea temporal científica de la historia de la Tierra, la escala del tiempo geológico. La razón es sencilla. Los custodios del tiempo geológico deben construir sus líneas temporales a partir de registros físicos de la historia de la Tierra depositados en las rocas por los procesos geológicos que dan forma a nuestro planeta.

Para entender los desafíos que plantea definir el Antropoceno como un intervalo de tiempo geológico es necesario conocer los métodos científicos empleados en geología para construir la escala del tiempo geológico. Para empezar, hay que saber que el tiempo geológico se infiere a partir de las capas o estratos que se van depositando en el transcurso de periodos de tiempo prolongados para dar lugar a un registro estratigráfico en capas. Por ejemplo, un registro así se puede conservar en las capas de sedimentos que se han ido asentando en el fondo de un lago tras muchos años, las cuales podrían solidificarse más tarde y dar lugar a una roca sedimentaria.

Los geólogos especializados en el estudio de estos registros estratigráficos, llamados estratígrafos, son los custodios del tiempo geológico. Es la comunidad científica de estratígrafos la que decidirá en última instancia la suerte que tendrá la propuesta de introducir el Antropoceno como intervalo temporal en la historia de la Tierra. Para entender los argumentos a favor y en contra de admitir el Antropoceno como intervalo de tiempo geológico, es esencial conocer las bases de la ciencia de la estratigrafía y cómo se establece la escala del tiempo.

Los orígenes de la estratigrafía

La estratigrafía comenzó con el trabajo realizado a finales del siglo XVII por Nicholas Steno y su interpretación de la estructura en capas que presentan las rocas sedimentarias (figura 8). Su «ley de la superposición», según la cual las capas más nuevas de las rocas sedimentarias deben formarse sobre las más antiguas, sigue siendo el concepto esencial de la estratigrafía. A ello añadió dos principios, según los cuales, sea cual sea el estado u orientación de las capas de las rocas sedimentarias actuales, estas deben haberse formado en sus orígenes como capas horizontales y continuas.



8. Lechos de turbidita, una roca sedimentaria de Cornualles, Inglaterra, buen ejemplo de capas sedimentarias.

Los principios de Steno permitieron interpretar las rocas sedimentarias antiguas como capas de tiempo, por muy deformadas, inclinadas, erosionadas o revueltas que estuvieran a causa de diversos procesos geológicos. Steno y otros estudiosos reconocieron también que las características físicas (mineralogía, textura, color, etc.) y el contenido fósil de las capas podían utilizarse para diferenciarlas entre sí y para establecer una correlación de las

capas en distintas formaciones rocosas, incluso cuando estuvieran expuestas en lugares diferentes.

Un siglo después, el trabajo más transformador de la estratigrafía llegó de la mano de un perito inglés de minas, canales, zanjas y pozos de carbón. Trabajando literalmente en las trincheras, William Smith adquirió un conocimiento profundo de los diversos estratos que observó en toda Gran Bretaña. Al relacionar entre sí los distintos fósiles y los diferentes tipos de roca hallados en aquellas observaciones locales, los conectó con capas estratigráficas que abarcaban toda Inglaterra, Gales y Escocia. Con aquella hazaña, que aún se conoce como «el mapa que cambió el mundo», Smith fue la primera persona que cartografió con precisión la emergencia y la exposición de capas de roca continuas a través de grandes áreas. Aunque sus esfuerzos para lograr credibilidad incluyeron una temporada en la prisión de morosos y gran parte de su reconocimiento fue póstumo, Smith es considerado ahora el padre de la geología inglesa. Su mapa sigue colgado en Burlington House, sede de la Sociedad Geológica de Londres.

La ciencia estratigráfica encuentra aplicaciones prácticas que van desde la minería hasta la construcción. Sin embargo, su utilidad de mayor alcance tal vez sea la reconstrucción del tiempo geológico. El tiempo geológico es fundamental para conocer la corteza primitiva de nuestro planeta, los orígenes y la evolución de la vida, e incluso los procesos de cambio del sistema Tierra que continúan hasta el momento presente. Y los estratígrafos han desarrollado gran variedad de herramientas que superan con creces cualquiera de las ideas que llegaran a concebir Steno o Smith.

Geocronología

Las primeras reconstrucciones estratigráficas del tiempo geológico eran geocronologías relativas. Mediante este enfoque, la posición relativa de las capas rocosas, o unidades estratigráficas, se interpreta como sucesiones temporales donde las capas inferiores son anteriores, y las superiores más recientes. Las capas individuales se identifican a través de sus características físicas como unidades litoestratigráficas, o sobre la base de una biota fósil distintiva como unidades bioestratigráficas, o mediante una combinación de ambas. Aunque con este procedimiento no se pueden determinar fechas absolutas, el empalme de largas sucesiones de estas unidades permitió reconstruir intervalos de tiempo geológico muy significativos. Con ello se observaron cambios evolutivos en los organismos fósiles, lo que dio lugar a

otro principio estratigráfico, el de la sucesión fósil, que consiste en que la biota tiende a variar junta siguiendo sucesiones, lo que proporcionó una prueba sólida para apoyar la teoría de la evolución de Darwin que empezaba a emerger por entonces.

A mediados del siglo XVIII, Giovanni Arduino y otros especialistas en estratigrafía acometieron los primeros intentos para ensamblar una línea del tiempo continua que abarcara toda la historia de la Tierra. En este primer calendario del tiempo geológico se identificaron cuatro intervalos temporales diferentes, u órdenes, con cuatro tipos distintos de rocas que se etiquetaron de manera sucesiva desde el Primario hasta el Cuaternario. Además se calculó la duración de los distintos intervalos temporales de acuerdo con su grosor y ritmo de formación. Estos ritmos se estimaron teniendo en cuenta el tiempo necesario para la descomposición química y física de las rocas (meteorización), la erosión, la sedimentación y la compresión y cementación de los sedimentos en rocas sólidas (litificación).

A principios del siglo XX, una nueva técnica revolucionó la estratigrafía. La datación radiométrica, de la que la datación con carbono es un ejemplo conocido, permitió asignar por primera vez fechas absolutas a las unidades estratigráficas, y con ello se obtuvieron unidades geocronológicas con fechas de formación conocidas.

La datación radiométrica se basa en el principio de que algunos elementos tienen isótopos (variantes con un número diferente de neutrones) que son radiactivos y que se desintegran en procesos radiactivos con diferentes ritmos, o con distintos periodos de semidesintegración, al decaer y dar lugar a otros elementos e isótopos. Por ejemplo, el isótopo más común del carbono es el carbono-12 (o ^{12}C), con 6 protones + 6 neutrones. El carbono-12 es estable y no se desintegra. Pero el carbono también se encuentra en la naturaleza en forma de carbono-14 (o ^{14}C), con 8 neutrones. El carbono-14 es radiactivo, y la cantidad presente de este isótopo se reduce a la mitad, por desintegración, al cabo de un periodo temporal de 5730 años (su periodo de semidesintegración). Midiendo las cantidades relativas de los diferentes isótopos en una muestra de roca u otro material, se pueden calcular las edades absolutas a partir de la cantidad que queda de cada isótopo y sus periodos de semidesintegración respectivos. El periodo de semidesintegración del carbono-14 es breve, de 5730 años, lo que limita su uso a la datación de materiales ricos en carbono de no más de 40 000 años de antigüedad, pero algunos elementos tienen isótopos con periodos de cientos de millones de años, como el uranio-235 (cuya semidesintegración requiere unos 700

millones de años), los cuales pueden emplearse para fechar unidades cronoestratigráficas de más de mil millones de años.

En 1913, la datación radiométrica permitió determinar la edad de una muestra de roca en 1600 millones de años. Y eso fue solo el principio. Con el advenimiento de la datación absoluta y la geocronología absoluta se pudieron construir escalas de tiempo geológico para unidades de tiempo y de roca relacionadas. La estratigrafía también adquirió herramientas adicionales, como la quimioestratigrafía, que permitió identificar y correlacionar las unidades estratigráficas a partir del análisis detallado de su composición química e isotópica, y la magnetoestratigrafía, con la que se pudo precisar la edad de las unidades de acuerdo con reconstrucciones históricas de los cambios en la polaridad magnética de la Tierra. Al final, la combinación de la datación radiométrica con este conjunto ampliado de herramientas estratigráficas permitió reconstruir con un grado de detalle fabuloso más de 4000 millones de años de la historia de la Tierra.

La escala del tiempo geológico

La escala del tiempo geológico reúne el trabajo de generaciones de estratígrafos en una única geocronología estandarizada de la historia de la Tierra (figura 9). Esta coordinación masiva del trabajo científico se agilizó con la creación de la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) en 1974, como un grupo de trabajo dentro de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, el organismo internacional que coordina esta disciplina.

Desde sus inicios, el cometido principal de la ICS ha consistido en ordenar la historia de la Tierra en la escala de tiempo geológico basada en una jerarquía estandarizada de unidades cronoestratigráficas. Los eones son los intervalos más grandes y se subdividen en unidades cada vez más breves de eras, periodos, épocas y edades. El desarrollo de una estructura tan ordenada para el tiempo geológico por parte de la ICS es aún más inestimable si se tiene en cuenta que constituye la combinación del trabajo estratigráfico realizado en yacimientos de todo el mundo desde finales del siglo XVIII. Por ejemplo, Leopold von Buch estableció el periodo Jurásico en 1839 basándose en las observaciones que realizó Alexander von Humboldt en 1795 sobre las formaciones rocosas de los montes del Jura (Suiza). Desde su primera publicación en 1982, la escala de tiempo geológico se ha revisado y

actualizado periódicamente a medida que han aparecido nuevas pruebas paleontológicas que han mejorado las técnicas de datación.

La GTS divide 4550 millones de años de historia de la Tierra en unidades cronoestratigráficas que reflejan muchos de los acontecimientos clave de la historia de la Tierra, pero no todos. De los cinco episodios de extinción masiva que se suelen reconocer en la historia de la Tierra, en los que se perdió una cantidad excepcional de especies dentro de intervalos muy breves de tiempo, cuatro coinciden con fronteras entre periodos. El más espectacular, que casi acabó con toda la vida del planeta, ocurrió al final del periodo Pérmico, fechado en la actualidad hace 252 millones de años, mientras que el más famoso, el que causó la extinción masiva de los dinosaurios no aviares y los reptiles marinos, se produjo en la frontera entre el Cretácico y el Paleógeno (antes conocida como límite K-T), hace 66 millones de años. En el límite inferior del periodo Cámbrico, hace 541 millones de años, que también da comienzo al eón en el que nos encontramos en la actualidad, el Fanerozoico (o «periodo de la vida visible»), aparecen con claridad registros fósiles de animales pluricelulares y cavadores.

Sin embargo, la escala de tiempo geológico no cuenta con ningún límite geológico que marque la emergencia de la vida (que tuvo lugar a principios del eón Arcaico), la aparición de los primeros organismos fotosintéticos productores de oxígeno (en el Paleoproterozoico), los primeros animales pluricelulares o la aparición de las plantas en tierra firme (ambos del Neoproterozoico tardío), ni tan siquiera de los primeros animales en tierra firme (probablemente del Silúrico). Esto se debe a motivos absolutamente pragmáticos. La escala de tiempo geológico no puede incluir ni tan siquiera los hitos más importantes de la historia de la Tierra si estos carecen de marcadores estratigráficos identificables.

Los acontecimientos de la historia de la Tierra que se indican en la escala de tiempo geológico son tan solo aquellos que han dejado huellas estratigráficas globales claras y reconocibles, como la capa rica en iridio que se depositó tras el impacto del meteorito que, según muchas hipótesis, causó la extinción de los dinosaurios. La oxigenación de la Tierra por parte de los organismos fotosintéticos, sin duda una de las mayores alteraciones del sistema Tierra, fue sencillamente demasiado gradual para dejar una marca estratigráfica identificable. En cambio, la aparición de fósiles animales fácilmente identificables (la base principal de la bioestratigrafía) marca una división clarísima en la escala de tiempo geológico, la separación entre el eón en el que nos encontramos en la actualidad y el Precámbrico, un término

genérico con el que se designan los primeros 4060 millones de años de la historia de la Tierra. Aunque los animales pluricelulares empezaron a existir decenas de millones de años antes de ese momento divisorio, aquellas primeras especies tenían cuerpos blandos y dejaron pocos fósiles manifiestos.

Eón	Era	Periodo	Serie / Época	GSSP	edad numérica (Ma) presente
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	✓	0.0117
			Pleistoceno	✓	2.58
		Neógeno	Plioceno	✓	5.333
			Mioceno	✓	23.03
		Paleógeno	Oligoceno	✓	33.9
			Eoceno	✓	56.0
			Paleoceno	✓	66.0
	Mesozoico	Cretácico	Superior	✓	100.5
			Inferior		~ 145.0

Eón	Era	Periodo		Serie / Época	GSSP	edad numérica (Ma)
						~ 145.0
Fanerozoico	Mesozoico	Jurásico		Superior		163.5 ±1.0
				Medio	✓	174.1 ±1.0
				Inferior	✓	201.3 ±0.2
		Triásico		Superior	✓	~ 237
				Medio		247.2
				Inferior	✓	251.902 ±0.024
	Paleozoico	Pérmico		Lopingiano	✓	259.1 ±0.5
				Guadalupiano	✓	272.95 ±0.11
				Cisuraliano	✓	298.9 ±0.15
		Carbonífero	Pensilvaniano	Superior		307.0 ±0.1
				Medio		315.2 ±0.2
				Inferior	✓	323.2 ±0.4
			Misisipiano	Superior		330.9 ±0.2
				Medio	✓	346.7 ±0.4
				Inferior	✓	358.9 ±0.4

Eón	Era	Periodo	Serie / Época	GSSP	edad numérica (Ma)
Fanerozoico	Paleozoico	Devónico			358.9 ± 0.4
			Superior		382.7 ±1.6
			Medio		393.3 ±1.2
			Inferior		419.2 ±3.2
		Silúrico	Pridoli		423.0 ±2.3
			Ludlow		427.4 ±0.5
			Wenlock		433.4 ±0.8
			Llandovery		443.8 ±1.5
		Ordovícico	Superior		458.4 ±0.9
			Medio		470.0 ±1.4
			Inferior		485.4 ±1.9
		Cámbrico	Furongiense		~ 497
			Serie 3		~ 509
			Serie 2		~ 521
			Terreneuviense		541.0 ±1.0

Eón		Era	Periodo	GSSP GSSA	edad numérica (Ma)
Precámbrico	Proterozoico	Meoproterozoico			541.0 ±1.0
			Ediacárico		~ 635
			Criogénico		~ 720
			Tónico		1000
		Mesoproterozoico	Esténico		1200
			Ectásico		1400
			Calímmico		1600
		Paleoproterozoico	Estatérico		1800
			Orosírico		2050
			Riásico		2300
			Sidérico		2500
	Arcaico	Neoarcaico			2800
		Mesoarcaico			3200
		Paleoarcaico			3600
		Eoarcaico			4000
	Hádico				~ 4600

El límite inferior de las unidades de todos los rangos se está definiendo ahora a través de Secciones Estratotipo y Puntos de Límite Global (GSSP), incluido el de los eones Arcaico y Proterozoico, definidos desde hace tiempo mediante Edades Estratigráficas Globales Estándar (GSSA). En el sitio web http://www.stratigraphy.org. se pueden consultar esquemas e información detallada sobre GSSP ya ratificados. La URL del presente esquema se da más abajo.

Las edades numéricas están sujetas a revisión y no definen las unidades del Fanerozoico y del Ediacárico; esto solo lo hacen los GSSP. Para los límites del Fanerozoico sin GSSP ratificados o sin edades numéricas delimitadas, se proporciona una edad numérica aproximada (~).

Las edades numéricas para todos los sistemas, excepto el Pleistoceno inferior, el Paleógeno superior, el Cretácico, el Triásico, el Pérmico y el Precámbrico, se han tomado del artículo científico «A Geologic Time Scale 2012», de Gradstein *et al.* (2012); las edades correspondientes al Pleistoceno inferior, el Paleógeno superior, el Cretácico, el Triásico, el Pérmico y el Precámbrico han sido proporcionadas por las subcomisiones pertinentes de la ICS.

Las diversas tonalidades de este esquema se corresponden con las de la Comisión del Mapa Geológico del Mundo (http://www.ccgm.org)

9. Escala de tiempo geológico de la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) donde se muestran los eones, eras, periodos y épocas (ilustración basada en la escala de tiempo geológico de 2017).

(Ma = millones de años atrás).

Los métodos de la estratigrafía son precisos. Que un cambio transforme el sistema Tierra no basta para que figure en la escala de tiempo geológico. Para ello es necesario que el acontecimiento en cuestión deje la huella estratigráfica adecuada.

Clavos dorados

La escala de tiempo geológico se divide en intervalos mediante la identificación de límites estratigráficos, de tal modo que el límite inferior de un intervalo sirve como límite superior para el periodo precedente (por eso se los denomina estratotipos límite). Desde 1977, estos límites se definen a través de marcadores identificados y datados dentro de las sucesiones estratigráficas, por lo común consistentes en huellas bioestratigráficas, como la primera aparición de un fósil particular. Estos marcadores definidos y fechados, conocidos informalmente como «clavos dorados», identifican un «punto específico en una sucesión específica de estratos de roca», y reciben el nombre formal de Sección Estratotipo y Punto de Límite Global (GSSP).

En la actualidad aún continúa el esfuerzo para marcar todos los límites temporales en la escala de tiempo geológico a través de GSSP. Debido a la escasez de huellas fósiles, los límites del Precámbrico se marcan sobre todo mediante tiempos cronológicos, o Edades Estratigráficas Globales Estándar (GSSA), en lugar de hacerse con GSSP. Sin embargo, el objetivo último es marcar todos los intervalos de la escala de tiempo geológico mediante GSSP revisados por pares y publicados.

Los GSSP son mucho más que simples puntos fechados en las rocas. Tras marcar un punto específico dentro de una sucesión estratigráfica concreta, cada GSSP queda registrado formalmente y se conserva en un lugar accesible para permitir observaciones futuras. Por ejemplo, el GSSP que marca el límite entre el Precámbrico y el Cámbrico se identifica con la primera aparición de las trazas fósiles características de una especie excavadora, denominadas *Treptichnus pedum*, en una sucesión rocosa situada en una reserva natural de Fortune Head, Terranova (el «GSSP del Fortuniense»; figura 10).



10. Ejemplo de una Sección Estratotipo y Punto de Límite Global (GSSP), o «clavo dorado», que marca la base del periodo Ediacárico. Sito en Ediacara, Australia del Sur.

Aunque algunos GSSP se marcan en su lugar de origen con un verdadero «clavo dorado» de metal, no es algo estrictamente necesario. Lo indispensable es que cada GSSP represente el mejor registro posible tanto del marcador del límite como de la sucesión estratigráfica situada por encima y por debajo de él. Una de las preocupaciones principales es que la frontera identificada por el GSSP sea isócrona, es decir, que constituya una unidad cronoestratigráfica que pueda identificarse en múltiples lugares del mundo al mismo tiempo, y no una unidad diacrónica que varíe en cuanto a edad de un sitio a otro. Para evitar la selección de marcadores diacrónicos hay que observar múltiples sucesiones estratigráficas en diversas partes del mundo y examinarlas conjuntamente como una síntesis global. Es más, el GSSP ideal también debe poder fecharse mediante técnicas radiométricas u otros métodos fiables, y tiene que incluir múltiples marcadores distintos, tanto bioestratigráficos como de otro tipo (magnetoestratigráficos, quimioestratigráficos), que puedan correlacionarse en el tiempo a través de las sucesiones estratigráficas de todo el mundo. Como veremos más adelante, la necesidad de rechazar los marcadores diacrónicos y, por tanto, los procesos ambientales diacrónicos, se

ha convertido en punto de fricción dentro del debate sobre la definición de un GSSP para el Antropoceno.

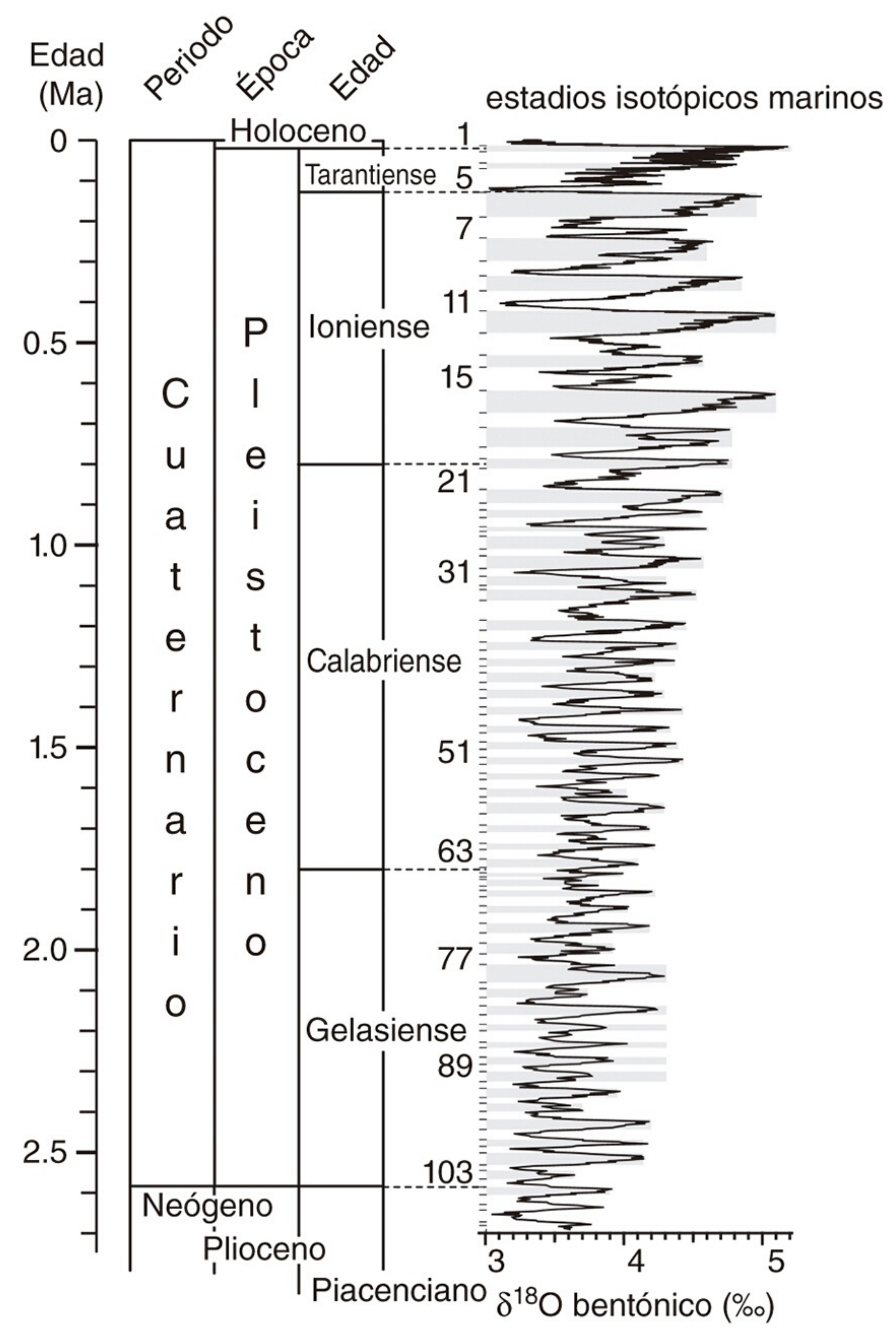
En conjunto, estos rigurosos requisitos suelen ser difíciles de cumplir. Por lo común se precisan soluciones pragmáticas para resolver numerosas cuestiones estratigráficas. La culminación de una sola propuesta de GSSP puede precisar años de investigación meticulosa. Si se cumplen las condiciones, la propuesta de GSSP de un grupo de trabajo se somete a una revisión por pares. Tras recibir el voto favorable del grupo de trabajo en cuestión, la subcomisión matriz, la propia ICS y, por último, el Comité Ejecutivo de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, el GSSP queda ratificado y registrado en la escala de tiempo geológico. Mediante este procedimiento institucional formal, internacional y científico, la historia de la Tierra queda conectada con las huellas físicas de la historia de la Tierra que han quedado registradas en las rocas. Este es el procedimiento que podría permitir marcar geológicamente la época del Antropoceno como el intervalo más reciente de la escala de tiempo geológico.

El Cuaternario

El periodo más reciente de la historia terrestre, que dio comienzo hace 2.6 millones de años, es el Cuaternario y, por tanto, este es el intervalo dentro del cual se definiría la época del Antropoceno. El Cuaternario ejemplifica los desafíos y las oportunidades del tiempo geológico, y sus raíces se extienden hasta los primeros días de la estratigrafía. Es el único orden del calendario terrestre que aún está en uso de los cuatro que propuso Arduino en 1759, aunque también el Cuaternario se eliminó de esa escala durante cinco años para recuperarlo en 2009. Además, como toda la evolución de nuestra especie acaeció dentro del Cuaternario, eso inspiró varios nombres alternativos; por ejemplo, el término «Antropogeno» era el preferido por los geólogos soviéticos en la década de 1980.

El Cuaternario representa un intervalo bastante frío de la historia de la Tierra, también conocido como «edad de hielo actual». Se distingue del periodo Neógeno que lo precede por atravesar ciclos glaciales e interglaciales más intensos y por albergar capas de hielo continental más extensas durante los intervalos fríos y glaciales. Los registros estratigráficos del Cuaternario, que abarcan los 2.6 millones de años más recientes de la Tierra, suelen ser más abundantes, más accesibles y más detallados que los de intervalos anteriores. Esto ha permitido también reconstruir diversos registros continuos

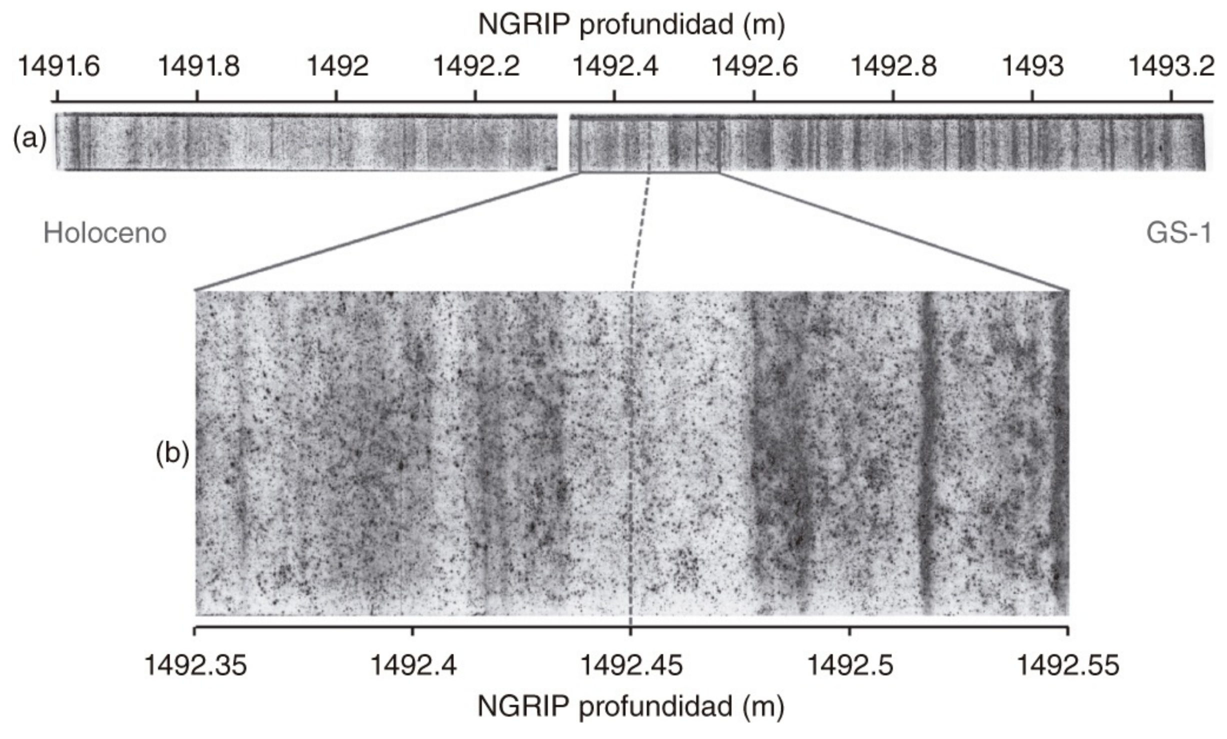
de los cambios del sistema Tierra, aparte de los límites discretos utilizados en la escala de tiempo geológico. Por ejemplo, los ciclos glaciales e interglaciales del Cuaternario se han reconstruido con gran detalle midiendo cambios en los isótopos de oxígeno hallados en testigos de sedimentos oceánicos profundos (figura 11).



11. Escala temporal del Cuaternario comparada con los estadios isotópicos marinos (MIS). Los MIS están definidos por grandes cambios globales de temperatura indicados por variaciones en isótopos de oxígeno ($\delta^{18}O$). Los MIS con números impares son periodos cálidos; el MIS 1 coincide con el intervalo interglacial del Holoceno.

El isótopo más ligero del oxígeno, el oxígeno ^{16}O, se evapora más fácilmente desde el mar y deja tras de sí agua enriquecida en la variante más pesada del oxígeno ^{18}O. Cuando se acumula hielo en regiones continentales durante las glaciaciones, el oxígeno ^{16}O queda atrapado en el hielo y da lugar a mares y sedimentos más enriquecidos aún con oxígeno ^{18}O. La medición de la proporción de oxígeno ^{18}O y oxígeno ^{16}O en los sedimentos de distintos intervalos temporales permite inferir con gran precisión el calentamiento y el enfriamiento del planeta. Partiendo del momento presente, se ha enumerado cada fase del ciclo interglacial cálido y glacial frío de la Tierra mediante un sistema de estadios isotópicos marinos (MIS) de uso generalizado. Este sistema comienza con la designación MIS 1 para el intervalo interglacial cálido actual (la época del Holoceno), continúa con la designación MIS 2 para el «máximo glacial más reciente», y continúa así remontándose en el tiempo hasta llegar al Plioceno. Estos intervalos cíclicos también se han relacionado con cambios a largo plazo en el dióxido de carbono atmosférico y otros gases traza medidos en testigos de hielo, y se suelen emplear para reconstruir líneas de tiempo ecológicas y arqueológicas.

La mayor parte del Cuaternario abarca los numerosos ciclos glaciales e interglaciales de la época del Pleistoceno («más reciente»). La época del Holoceno («totalmente reciente») comienza tan solo 11 700 años antes del momento presente, y señala el cambio al intervalo interglacial cálido actual. El Holoceno es el único intervalo geológico cuyo límite inferior está marcado por un GSSP en un testigo de hielo sólido extraído de Groenlandia (figura 12).



12. GSSP del Holoceno. El límite inferior del Holoceno está marcado a una profundidad de 1492.45 metros en un testigo de hielo extraído del casquete helado de Groenlandia.

El hielo es una variedad de roca (un mineral sólido), y el casquete helado de Groenlandia consta de capas anuales de nieve que se han ido compactando con el paso del tiempo. El registro estratigráfico que proporciona el hielo continental presenta una definición y una uniformidad bastante más precisas que los sedimentos oceánicos, que pueden mezclarse y desordenarse debido al movimiento de animales (es lo que se conoce como bioturbación) y otros procesos. Por esta razón, aunque el GSSP del Holoceno pretende marcar el inicio del intervalo interglacial actual, al igual que el registro sedimentario definido mediante MIS 1, el registro del hielo es un indicador más preciso que el que se puede inferir a partir de sedimentos marinos (11700 +/- 100 años antes del momento presente).

El Cuaternario ha servido durante mucho tiempo como banco de pruebas para el avance de las técnicas y de la teoría del tiempo geológico, lo que incluye métodos para contar hacia atrás desde el momento presente, el empleo de testigos de hielo y la reconstrucción de líneas temporales detalladas y continuas mediante procedimientos isotópicos, datación radiométrica y quimioestratigrafía. Para definir el Antropoceno como una unidad geológica dentro de la escala de tiempo geológico tal vez se necesiten criterios estratigráficos aún más novedosos.

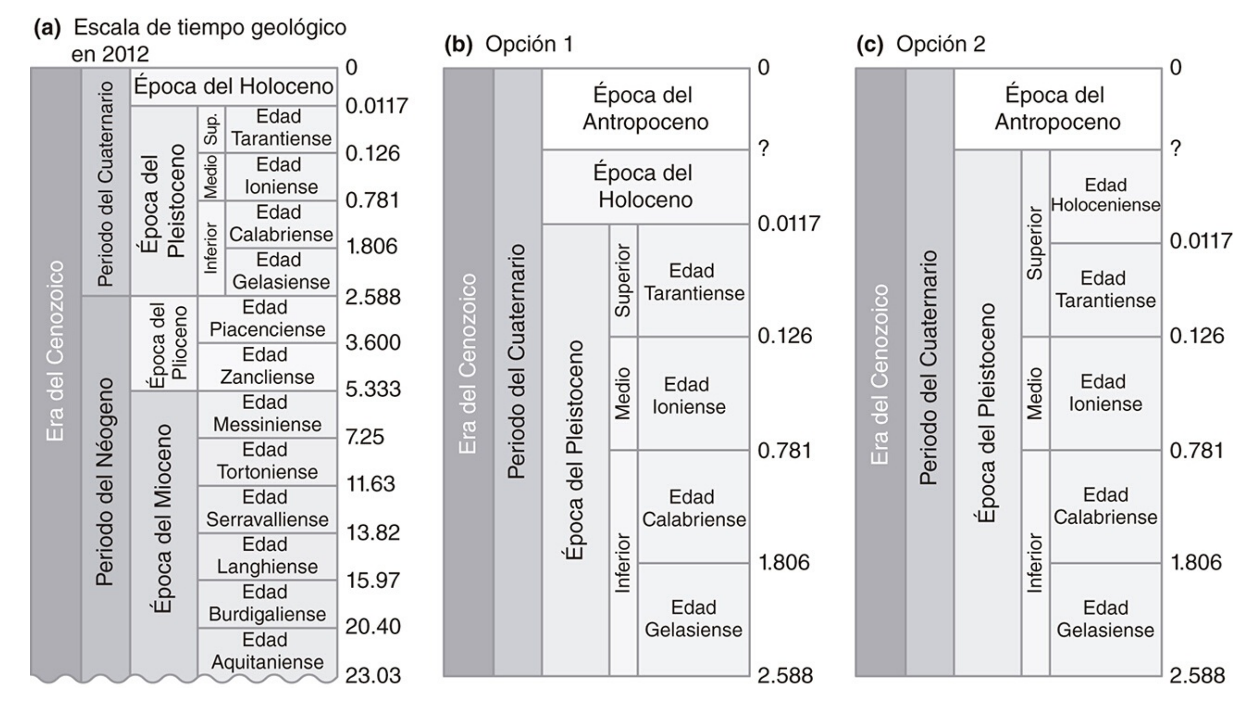
El Grupo de Trabajo del Antropoceno

En 2009, la Subcomisión de Estratigrafía del Cuaternario de la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) recomendó a Jan Zalasiewicz, profesor de la Universidad de Leicester (Reino Unido) y experto en bioestratigrafía, que formara un Grupo de Trabajo del Antropoceno. El nuevo grupo tendría un único cometido: examinar los argumentos para admitir un nuevo intervalo de tiempo geológico basados en «los amplios efectos del influjo antropogénico en parámetros estratigráficos significativos». En otras palabras, el grupo de trabajo se encargaría de estudiar la conveniencia de subdividir el periodo Cuaternario de la escala de tiempo geológico mediante la identificación del límite inferior de una posible época del Antropoceno, a ser posible con un nuevo GSSP. Con Zalasiewicz en la presidencia, el grupo de trabajo se creó en cuestión de un año con dieciséis miembros, en torno a la mitad de los cuales eran estratígrafos y, el resto, una mezcla de especialistas en ciencias ambientales con experiencia en el estudio del cambio climático global antropogénico, entre quienes estaban Paul Crutzen, Will Steffen y yo mismo, y hasta un abogado, Davor Vidas, experto en el derecho marítimo.

Trabajando a tiempo parcial y sin financiación, el grupo de trabajo echó a andar despacio. A diferencia de lo que ocurrió con los intervalos de tiempo geológico previos, la base estratigráfica para reconocer el Antropoceno exigía establecer una «comparación crítica entre el grado y el ritmo actual del cambio ambiental causado por procesos antropogénicos y las alteraciones ambientales del pasado geológico». Este era un requisito novedoso para la labor estratigráfica. Además, otra diferencia con los intervalos anteriores era que había una superabundancia de datos sobre los cambios recientes en la Tierra capaces de dejar registros estratigráficos, tanto naturales como antropogénicos, y que abarcaban desde perturbaciones en el clima global y la composición atmosférica, hasta la química de los océanos, la pérdida de biodiversidad, la contaminación ambiental, el aumento de la erosión del suelo y la alteración generalizada de los paisajes en regiones enteras. Desenredar esta abundancia de datos hizo el trabajo más difícil, no más fácil. También se plantearon interrogantes sobre la utilidad de formalizar el Antropoceno para la ciencia de la geología, algo que todavía suscita debate. Por fortuna, aún faltaban años para que surgiera la necesidad de realizar una propuesta formal de GSSP.

El interrogante que planteó Zalasiewicz al preguntar «¿Estamos en el Antropoceno?» tal vez no fuera el más difícil de responder. El consenso científico ya reconocía que la transformación de la Tierra por parte del ser humano estaba muy avanzada y que había abundantes signos estratigráficos de ella. En la práctica, por tanto, la principal cuestión a la que se enfrenta el Grupo de Trabajo del Antropoceno no es si se puede admitir este periodo dentro de la escala de tiempo geológico, sino en qué momento y sobre qué base. Cabría identificar un GSSP del Antropoceno en las capas de sedimentos, o de hielo, o de otros materiales, o incluso definirse cronológicamente mediante una edad estratigráfica global estándar (GSSA). También se contemplaba la posibilidad de admitirlo como una edad o incluso como un periodo, aunque la formulación preferida era claramente definirlo como una época mediante un clavo dorado (figura 13). Y ya se estaban considerando diversos marcadores posibles.

Paul Crutzen había asociado el Antropoceno con el fin del siglo XVIII y con la Revolución Industrial, ya que la quema de combustibles fósiles provocó un aumento inicial de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera por encima de las típicas del Holoceno. A partir de esta propuesta anterior, Will Steffen abogó por situar a mediados del siglo XX el momento culminante para el comienzo del Antropoceno, marcado por la «gran aceleración» de las actividades humanas hacia esa época. Y el geólogo Bill Ruddiman llegó a plantear que el Antropoceno podría identificarse miles de años antes de la Revolución Industrial como resultado de los desmontes generalizados de terrenos para practicar la agricultura, lo que provocó la liberación de dióxido de carbono y metano, y posiblemente el cambio climático global. Todas aquellas propuestas alentaban la perspectiva de un GSSP del Antropoceno. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, estratigráfico, solo una de las propuestas presentaba una base bastante clara e inequívoca para establecer un marcador estratigráfico global e isócrono: la dispersión de la lluvia radiactiva derivada de las pruebas con armas nucleares que comenzaron con la prueba Trinity de 1945.

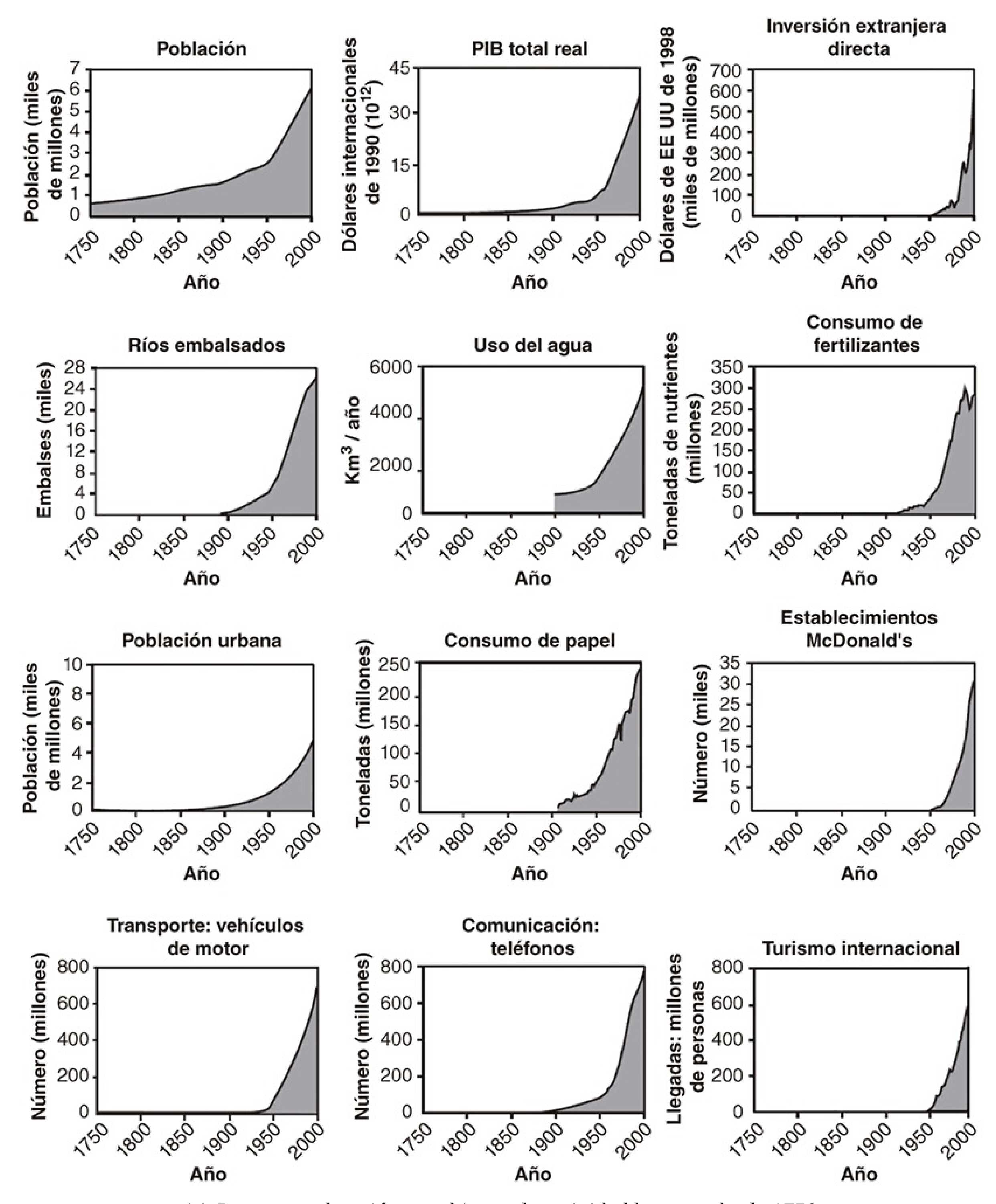


13. Posibles revisiones del Cuaternario para incluir el Antropoceno. (a) Escala de tiempo geológico vigente (GTS 2012; los números de la derecha indican millones de años). (b) Opción 1: fin de la época del Holoceno, seguida por una época del Antropoceno. (c) Opción 2: la época del Holoceno se sustituye por una época del Antropoceno y el Holoceno queda reducido a una edad dentro del Pleistoceno (el Grupo de Trabajo del Antropoceno no contempla en la actualidad esta opción).

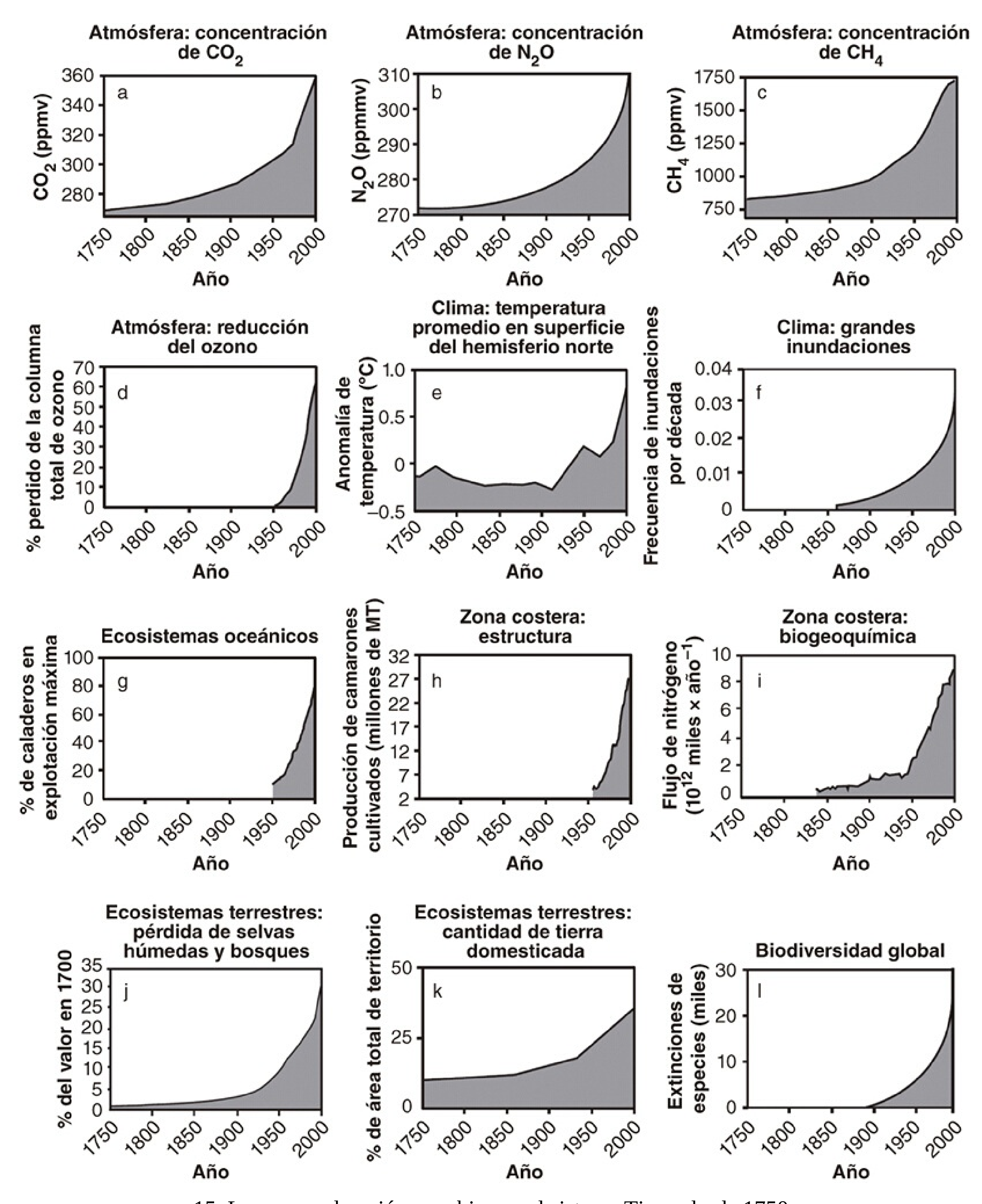
4. La gran aceleración

Para Will Steffen y otros miembros del Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP), la afirmación de que el ser humano estaba transformando el funcionamiento de la Tierra como sistema no era nueva. Se habían ido acumulando pruebas de ello durante décadas. De hecho, este punto de vista ya era mayoritario entre los especialistas en ciencias medioambientales. El desafío para Steffen y su equipo, encargados desde 1999 de revisar una década de investigación sobre el sistema Tierra para el IGBP, consistía en todo lo contrario a la escasez. El reto era integrar miles de artículos e informes en una interpretación coherente del cambio ambiental global desde la perspectiva de una ciencia del sistema Tierra.

Inspirándose en la idea del Antropoceno de Crutzen, el equipo se centró en los cambios del sistema Tierra provocados por la humanidad desde la Revolución Industrial. Para ello, recopilaron registros de las actividades humanas y de los cambios ambientales a partir de 1750 (antes de que James Watt desarrollara la máquina de vapor) y plasmaron su dinámica hasta el año 2000. Aunque las pruebas confirmaban claramente la transformación del sistema Tierra provocada por el ser humano, lo que encontraron los sorprendió. Su trabajo se publicó en 2004 en un informe del IGBP que ya se ha convertido en un clásico con el título *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure* [«Cambio global y el sistema Tierra: un planeta bajo presión»]. En él no se apreciaba un incremento progresivo de la transformación de la Tierra a medida que la Revolución Industrial cobraba fuerza y se extendía por todo el mundo. Más bien los datos mostraban un salto espectacular en el ritmo de los cambios humanos y medioambientales desde mediados del siglo XX. Su trabajo, presentado en dos paneles de doce gráficas, ponía de manifiesto un punto de inflexión impresionante en torno a 1950 en casi todas las actividades humanas y los cambios del sistema Tierra analizados, a partir del cual los índices de cambio se vuelven mucho más acusados y, en algunos casos, casi exponenciales (figuras 14 y 15).



14. La gran aceleración: cambios en la actividad humana desde 1750.



15. La gran aceleración: cambios en el sistema Tierra desde 1750.

El mensaje de la ciencia del sistema Tierra era claro. A partir de la década de 1950 los humanos empezamos a alterar el funcionamiento de la Tierra como sistema para conducirla hacia un nuevo estado sin precedentes. Tal como señalaron en su informe:

> Los últimos 50 años han presenciado sin lugar a dudas la transformación más veloz de la relación humana con el mundo natural en la historia de la humanidad… La magnitud, la escala espacial y el

ritmo del cambio inducido por el ser humano no tienen precedentes en la historia de la humanidad y tal vez tampoco en la historia de la Tierra; el sistema Tierra está operando ahora en un «estado no análogo».

Por analogía con la obra titulada *La gran transformación*, de Karl Polanyi, en 2005 se acuñó la expresión «la gran aceleración» y empezó a usarse en círculos científicos como término habitual para describir el espectacular salto habido a mediados del siglo XX en el cambio ambiental antropogénico a escala mundial. Las gráficas que evidenciaban estos cambios pronto se convirtieron en el símbolo del Antropoceno tanto dentro como fuera de la comunidad científica. Desde la concepción del sistema Tierra, el Antropoceno comenzó a mediados del siglo XX.

Planet Under Pressure

La obra ya clásica *Planet Under Pressure* [«Planeta bajo presión»] exponía un amplio conjunto de cambios humanos y ambientales como base para entender la transformación del sistema Tierra; con ello no solo abogaba por el reconocimiento de un nuevo intervalo temporal en la historia de la Tierra, sino también por la necesidad de interpretar el cambio ambiental antropogénico a escala mundial como un conjunto de procesos complejos, debidos a múltiples causas y que afectan a todo el sistema Tierra. Los seres humanos estaban haciendo mucho más que alterar la atmósfera y el clima de la Tierra, también estaban provocando cambios globales en la biodiversidad, contaminando los océanos con la escorrentía de los fertilizantes agrícolas, modificando el curso de los ríos hasta su desembocadura en el mar y transformando los hábitats naturales en todo el mundo. No podía considerarse que la incidencia humana en el medio ambiente global se redujera tan solo a la quema de combustibles fósiles o a la fabricación de productos químicos industriales. El crecimiento demográfico, la «domesticación» del territorio para practicar la agricultura, el desarrollo económico y hasta la inversión extranjera directa forman parte de la combinación de fuerzas humanas que están alterando el funcionamiento de la Tierra como sistema. El cambio ambiental antropogénico a escala mundial aparecía como un proceso multidimensional. Además, las interacciones entre sus numerosas dimensiones y los efectos en cascada desde lo local hasta lo regional y, en última instancia, hasta lo global, podrían tener unas consecuencias

imprevisibles para el sistema Tierra en su conjunto. Y se propuso un principio clave.

Para reconocer la trascendencia mundial de los cambios antropogénicos desde el punto de vista del sistema Tierra (la base para contemplar una transición planetaria hacia una «era del Antropoceno») sería necesario demostrar que los seres humanos han provocado que los procesos del sistema Tierra cambien más allá de su «rango de variabilidad natural» hacia un «estado no análogo». Ese «rango natural» de cada uno de los parámetros del sistema Tierra, como la temperatura o el dióxido de carbono atmosférico, tendría que determinarse primero en términos de patrones de variación a largo plazo observados durante intervalos de la historia de la Tierra que ascendieran a medio millón de años o más, según una estimación. A continuación, se necesitarían pruebas para demostrar que las actividades humanas han desplazado ese parámetro o atributo fuera de ese rango natural. Los cambios ambientales locales o incluso regionales no serían suficientes.

Domesticar el territorio

La humanidad empezó a usar el territorio para la agricultura y sus asentamientos hace más de 10 000 años. Pero la magnitud, el alcance, la intensidad y el ritmo de transformación de los terrenos para uso humano aumentaron de forma espectacular en la era industrial. Las estimaciones del uso actual del territorio a escala mundial son diversas, pero en general indican que entre el 40 % y el 50 % de la superficie continental carente de hielo del planeta se utiliza hoy para agricultura, silvicultura y núcleos de población. Aproximadamente el 11 % de la superficie terrestre se destina al cultivo, el 25 % a pastos y ganadería, y entre el 1 % y el 3 % a núcleos urbanos y de población y otras infraestructuras. Los bosques administrados o plantados para producir madera, combustible, papel, caucho y otros productos ocupan entre el 2 % y el 10 % de la tierra. Del territorio restante no destinado a estos usos intensivos directos, al menos la mitad o más está alterado por la extracción local de combustible, la caza, la recolección de alimentos, la contaminación y otros impactos humanos locales. Como resultado, tres cuartas partes de la biosfera terrestre ha sufrido una transformación directa o indirecta debido al empleo humano del territorio. Menos de una cuarta parte continúa sin sufrir la incidencia directa de la acción humana, y en su mayoría se trata de las regiones menos productivas, más frías y más secas de la

biosfera terrestre, aunque también quedan algunas en los trópicos, donde las enfermedades endémicas y otros obstáculos limitan la colonización humana.

Las consecuencias ambientales de la utilización humana del territorio van desde las emisiones de gases de efecto invernadero hasta la contaminación ambiental, la erosión del suelo, la pérdida de hábitats, las extinciones de especies y las introducciones de especies foráneas en los ecosistemas. Pero quizá no haya mayor transformación ambiental que la que produce la agricultura, que comienza con el desbroce de la tierra y la labranza. La eliminación de la vegetación, por lo común mediante su quema con fuego, emite dióxido de carbono. Los suelos quedan desnudos, lo que favorece su erosión y su pérdida. La alteración, la roturación y el drenaje de los humedales generan la descomposición de abundante materia orgánica del suelo, lo que libera aún más dióxido de carbono. La anegación de terrenos para el cultivo de arroz emite volúmenes enormes de gas metano (CH_4), y cada molécula de este compuesto tiene un potencial para inducir un calentamiento de efecto invernadero más de diez veces superior al del dióxido de carbono (aunque pasa menos tiempo en la atmósfera que el CO_2). El empleo de fertilizantes ricos en nitrógeno (tanto en forma de abonos como de fertilizantes sintéticos) libera óxido nitroso (N_2O), un gas de efecto invernadero aún más potente, con un potencial de calentamiento más de 100 veces superior por molécula que el dióxido de carbono, y muy estable, además.

La aplicación de pesticidas y herbicidas perjudica a las especies tanto dentro como fuera de los campos agrícolas, lo que se suma al exceso de nutrientes de los fertilizantes que contamina estanques, lagos, arroyos, ríos y zonas costeras aguas abajo. La cría de ganado desplaza a los herbívoros autóctonos a través de la competencia directa y el control de depredadores y otros competidores. En muchos casos, también se desbroza la tierra para mejorar la productividad de la vegetación para el ganado, mientras que los sistemas de ganadería intensiva a gran escala (las «granjas industriales») generan emisiones de metano y otros gases de efecto invernadero a partir del estiércol, además de una contaminación ambiental similar a la de los campos de labor, aunque a menudo más concentrada y peligrosa. Los pollos domésticos son ahora el ave más abundante de la Tierra, y la biomasa del ganado supera por sí sola la de todos los demás animales vertebrados vivos juntos, incluido el ser humano.

La incidencia mundial de las zonas agropecuarias y urbanas, sin contar sus emisiones de gases invernadero, repercute en los suelos, y la

contaminación del agua, de los terrenos y del aire también transforma, reemplaza y desplaza las especies y los hábitats autóctonos. Aunque los usos de la tierra de baja intensidad, como el pastoreo o la silvicultura, pueden tener unos efectos bastante reducidos en muchas especies, su incidencia sobre las especies sensibles al influjo humano puede suponer la pérdida de todo un hábitat, ya que priva a estas especies de los recursos necesarios para mantener poblaciones viables. Al mismo tiempo, la humanidad ha trasladado e introducido especies por todo el mundo, tanto de manera intencionada, con plantas ornamentales, animales de compañía y especies para controlar otras especies, como de forma involuntaria, al facilitar su desplazamiento a bordo de los sistemas de transporte humano. Aunque la mayoría de las especies introducidas no llega a criar o solo instaura poblaciones marginales, algunas invaden el nuevo destino con rapidez y establecen grandes poblaciones en el territorio que desplazan a las especies autóctonas, sobre todo en los paisajes ya alterados por la actividad humana. En conjunto, la pérdida de hábitat, la caza, la producción de alimentos, la contaminación, las invasiones de especies alóctonas y otras presiones humanas amenazan cada vez más con la extinción a las poblaciones de especies vegetales y animales vulnerables, lo que provoca una pérdida veloz de biodiversidad a escala mundial. Si bien el uso del territorio para la agricultura y los núcleos de población transformó importantes áreas en todo el mundo mucho antes de 1950, el crecimiento de la población humana y el enriquecimiento de la dieta gracias al desarrollo económico industrial provocaron tanto una rápida expansión mundial del uso del suelo como un aumento enorme de su explotación intensiva, lo que incluye un empleo mucho mayor del regadío y de los productos químicos agrícolas.

Hidrosfera

La transformación humana de la hidrosfera comenzó hace más de 5000 años con la construcción de acequias, canales, presas, embalses, el desvío de ríos y arroyos, la excavación de pozos para extraer aguas subterráneas y otros sistemas de control del agua diseñados para sostener la producción agrícola y los núcleos de población. El regadío agrícola sigue siendo el principal uso que recibe el agua desviada por el ser humano, y representa entre el 60 y el 75 % de los 5000 km^3 aproximados que fluyen cada año por los sistemas de canalización desde el año 2000. Cada año unos 40 000 km^3 de agua dulce

llegan al mar en forma de escorrentía desde los continentes, pero menos de un tercio de ese volumen de agua es accesible a las sociedades humanas debido a las variaciones estacionales y geográficas de su distribución. Como resultado, las sociedades humanas ya están utilizando casi la mitad de las corrientes de agua dulce renovable disponibles.

La construcción de presas, pantanos, arrozales y otros sistemas de retención ha incrementado el almacenamiento de agua en tierra firme, y ha obstruido la llegada de las corrientes hasta el mar. El drenaje de los humedales para la agricultura y el desarrollo han provocado el efecto contrario. La liberación de agua por parte de la vegetación hacia la atmósfera se ha visto alterada por la roturación de tierras, la silvicultura y la construcción de infraestructuras, y el equilibrio entre la escorrentía y la retención de agua en los suelos y en espacios subterráneos también se ha visto alterado en un sentido opuesto por la pavimentación y el cultivo del territorio. Además, estos cambios hidrológicos generalizados han alterado el agua disponible no solo para los seres humanos, sino también para los peces y otras especies acuáticas y terrestres que dependen de la existencia de corrientes de agua inalteradas, tanto en términos de cantidad como de disponibilidad estacional y espacial. Los embalses y otros desvíos del agua también limitan el acarreo de los sedimentos y la contaminación hasta el mar, lo que provoca acumulaciones perjudiciales aguas arriba y reduce los depósitos de sedimentos en las zonas costeras, lo que a su vez conlleva el hundimiento del suelo y la exposición de las infraestructuras costeras a la crecida del mar.

Las captaciones de agua dulce han aumentado mucho con el incremento de la población y la demanda de alimentos y, por tanto, se aceleraron a partir de 1950. Durante la segunda mitad del siglo XX, la extracción rápida e insostenible de aguas subterráneas y los proyectos de embalses enormes tanto para la agricultura como para la producción energética contribuyeron a acelerar toda la variedad de modificaciones hidrológicas que ha ejecutado la humanidad en todos los continentes, aunque los proyectos de grandes presas han menguado en los últimos años. La disponibilidad de agua dulce también se ha visto reducida por la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas con productos químicos industriales y el exceso de nutrientes. Como resultado, desde la década de 1950, la hidrosfera terrestre (los sistemas de agua dulce de la Tierra) se ha visto profundamente transformada por las actividades humanas, y la limitación del agua dulce disponible se ha convertido en un asunto de gran preocupación a escala mundial.

La biosfera

Los seres humanos comenzaron a transformar la biosfera mucho antes de practicar la agricultura. Incluso antes del Holoceno, la presión que ejercieron la caza y la recolección sobre las especies terrestres, de agua dulce y marinas causó el declive de poblaciones en determinadas regiones y varias extinciones de especies a nivel planetario. A medida que las poblaciones humanas se propagaban y crecían, la presión de la caza y la recolección aumentaba en términos generales, aunque la práctica de la agricultura desplazó esa presión en cierta medida. Con la extensión de la agricultura, las especies terrestres se replegaron a hábitats cada vez más reducidos, y la pérdida de hábitat se convirtió en la causa principal de la merma de las poblaciones y de las extinciones de especies no perseguidas por la caza. Las especies acuáticas tienen una historia diferente.

El aumento de la demanda social de pescado, incluidas las especies de agua dulce, ha seguido ejerciendo una presión intensa sobre las especies salvajes que habitan en entornos de agua dulce, costeros y marinos. Salvo en unos pocos hábitats de agua dulce y costeros, la presión tradicional de la caza y la recolección no solían bastar para provocar grandes pérdidas y extinciones de poblaciones salvajes, y el océano abierto siguió estando muy poco afectado. Todo esto cambió con la pesca a escala industrial a medida que las flotas de «buques factoría» se expandían por los océanos. A partir de 1950, con el aumento de la población humana y de la demanda de productos del mar, también creció la escala y la intensidad de la pesca, lo que incluye el empleo de redes gigantescas arrastradas por los fondos marinos. Al mismo tiempo, los hábitats costeros se transformaron cada vez más por la escorrentía agrícola y la construcción de zonas urbanas y otras infraestructuras, incluida la eliminación de manglares y otros sistemas de humedales, lo que alteró zonas cruciales para la reproducción de numerosas especies.

Aparte de sufrir la pérdida de hábitats y la explotación directa, la tasa de extinción y el funcionamiento de la biosfera en su conjunto también se han visto afectados por la contaminación del agua y los cambios antropogénicos en los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y el fósforo. Los contaminantes tóxicos industriales que se dispersan por el agua, desde el plomo hasta el DDT, han perjudicado a las especies tanto de un modo directo como por la acumulación de toxinas en la cadena alimenticia, ya que los organismos contaminados son consumidos en grandes cantidades por los depredadores. Tal vez sorprenda que el exceso de nutrientes, en forma de nitrógeno y

fósforo reactivos, pueda tener unos efectos análogos a los de los contaminantes tóxicos, y en algunos casos incluso más extremos, para las especies y hábitats acuáticos.

El fósforo, al igual que el nitrógeno, es un nutriente limitante para el crecimiento de los cultivos. Aunque se necesita en cantidades menores, el fósforo reactivo (en diversas formas de fosfatos, PO_4), se ha extraído, procesado y aplicado como fertilizante en cantidades cada vez mayores desde la década de 1950. El exceso de fósforo, en su mayor parte unido a las partículas del suelo, puede acabar llegando a arroyos, ríos, estanques o lagos de agua dulce y enriquecerlos con nutrientes en un proceso que recibe el nombre de eutrofización. Esto estimula la proliferación de plantas microscópicas, algas y fitoplancton, así como de bacterias fotosintéticas (cianobacterias). Los brotes resultantes de algas y cianobacterias bloquean el paso de la luz hasta las aguas profundas, lo que inhibe el crecimiento de las praderas marinas y otras plantas que sostienen los hábitats esenciales de los fondos marinos y lacustres. Las masas de agua eutrofizadas (a menudo con aguas verdosas de olor penetrante, porque los estallidos de cianobacterias huelen fatal) se suelen dar en regiones agrícolas y costeras y también allí donde las aguas residuales urbanas o el estiércol del ganado, ricos en fósforo, se mezclan con las aguas sin tratar. El nitrógeno reactivo produce efectos similares en las zonas costeras, donde los ríos lo arrastran hasta el mar. Esto se debe a que, aunque el nitrógeno rara vez es un nutriente limitante en agua dulce, sí escasea en extremo en el agua marina. Por ello, los fenómenos de eutrofización más extremos se producen en los mares costeros. Las zonas muertas de las regiones costeras aparecen cuando el exceso de nitrógeno genera brotes enormes de algas que se hunden, se descomponen y, en el proceso, consumen tanto oxígeno que impiden respirar a las criaturas marinas. La incidencia de los estallidos de algas tóxicas, como las mareas rojas, también ha aumentado mucho desde la década de 1950, tanto en las regiones de agua dulce como en las zonas costeras.

Casi todas las formas de presión que ejerce el ser humano sobre las especies y los procesos ecológicos en toda la biosfera han experimentado un incremento espectacular desde la década de 1950. El uso de la tierra ha desplazado y contaminado los hábitats naturales, al mismo tiempo que se han explotado cada vez más las especies salvajes. Por todas estas razones juntas, desde la década de 1950 se ha producido un aumento brutal de las tasas contemporáneas de extinción de especies terrestres y marinas por causa de la acción humana, en especial de especies animales, y ahora son mucho más

elevadas que las tasas de extinción durante la mayor parte de la historia de la Tierra.

El nitrógeno

Los cambios en el ciclo del carbono de la Tierra se presentan a menudo como la prueba principal de un planeta alterado por el ser humano. Sin embargo, son muchas las razones por las que las alteraciones antropogénicas del ciclo biogeoquímico global del nitrógeno en este planeta son mucho más significativas. Los combustibles fósiles son una parte de ello, pero la inmensa mayoría de este cambio global antropogénico sin parangón ha surgido como resultado de un único proceso industrial que, por un lado, genera más nitrógeno reactivo que cualquier proceso natural y, por otro, ha permitido un crecimiento sin precedentes de las poblaciones humanas en el último medio siglo.

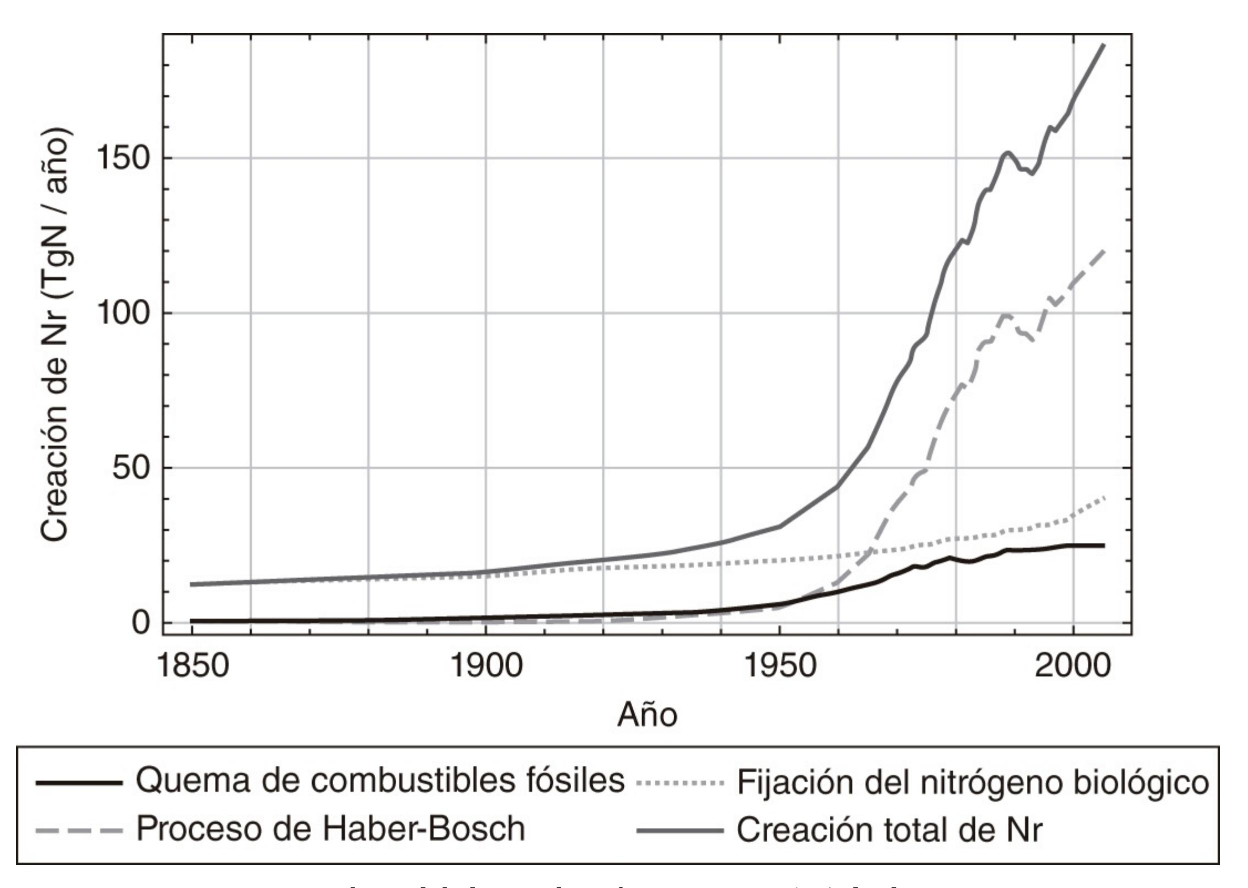
El nitrógeno es un componente básico de las proteínas y, por tanto, un nutriente esencial que necesitan todos los organismos vivos, incluidas las plantas cultivadas que nos proporcionan alimento. Sin los fertilizantes nitrogenados de síntesis industrial y su capacidad para acelerar el rendimiento de los cultivos en un espacio limitado, la producción de alimentos no podría haber cubierto la demanda de más de 4000 millones de seres humanos a partir de 1970, y menos aún las necesidades de los 7000 millones de personas que somos hoy o de los 11 000 millones que esperamos ser en 2100.

El nitrógeno, en forma de gas N_2 altamente estable y poco reactivo, es el elemento más abundante de la atmósfera terrestre (el 78 % de su volumen). Sin embargo, y aunque parezca sorprendente, también es el nutriente que limita con más frecuencia el crecimiento de las plantas terrestres y marinas. Esto se debe a que las plantas (y la mayoría de las bacterias) solo son capaces de captar y aprovechar las formas reactivas, «disponibles», del nitrógeno: en forma de iones de amonio (NH_4^+) y de nitrato (NO_3^-). El proceso que transforma N_2 estable en nitrógeno disponible requiere cantidades inmensas de energía. Solo unas pocas especies bacterianas han desarrollado el metabolismo especializado de alta energía necesario para «fijar» el nitrógeno mediante la disociación de N_2 para producir amonio, aunque muchas bacterias convierten con facilidad el amonio en nitrato. Y lo que es peor, el nitrógeno reactivo se elimina con facilidad de los suelos y el agua por lixiviación y escorrentía, y se vuelve a perder en la atmósfera cuando los microbios lo

convierten de nuevo en los gases estables N_2 o N_2O («desnitrificación»), y cuando la biomasa se cosecha o se quema, o los organismos muertos se hunden en los fondos marinos fuera del alcance de las plantas fotosintéticas que proliferan en la superficie iluminada por el Sol. Hasta 1910 y los trabajos de Fritz Haber y Carl Bosch, el nitrógeno era siempre un bien escaso, y el rendimiento de los cultivos era bajo. La única manera de obtener nitrógeno reactivo para usarlo como fertilizante consistía en extraerlo (de depósitos de guano fosilizado de aves), en cosechar estiércol y biomasa, o en cultivar legumbres, que son plantas que mantienen una simbiosis con bacterias capaces de fijar el nitrógeno.

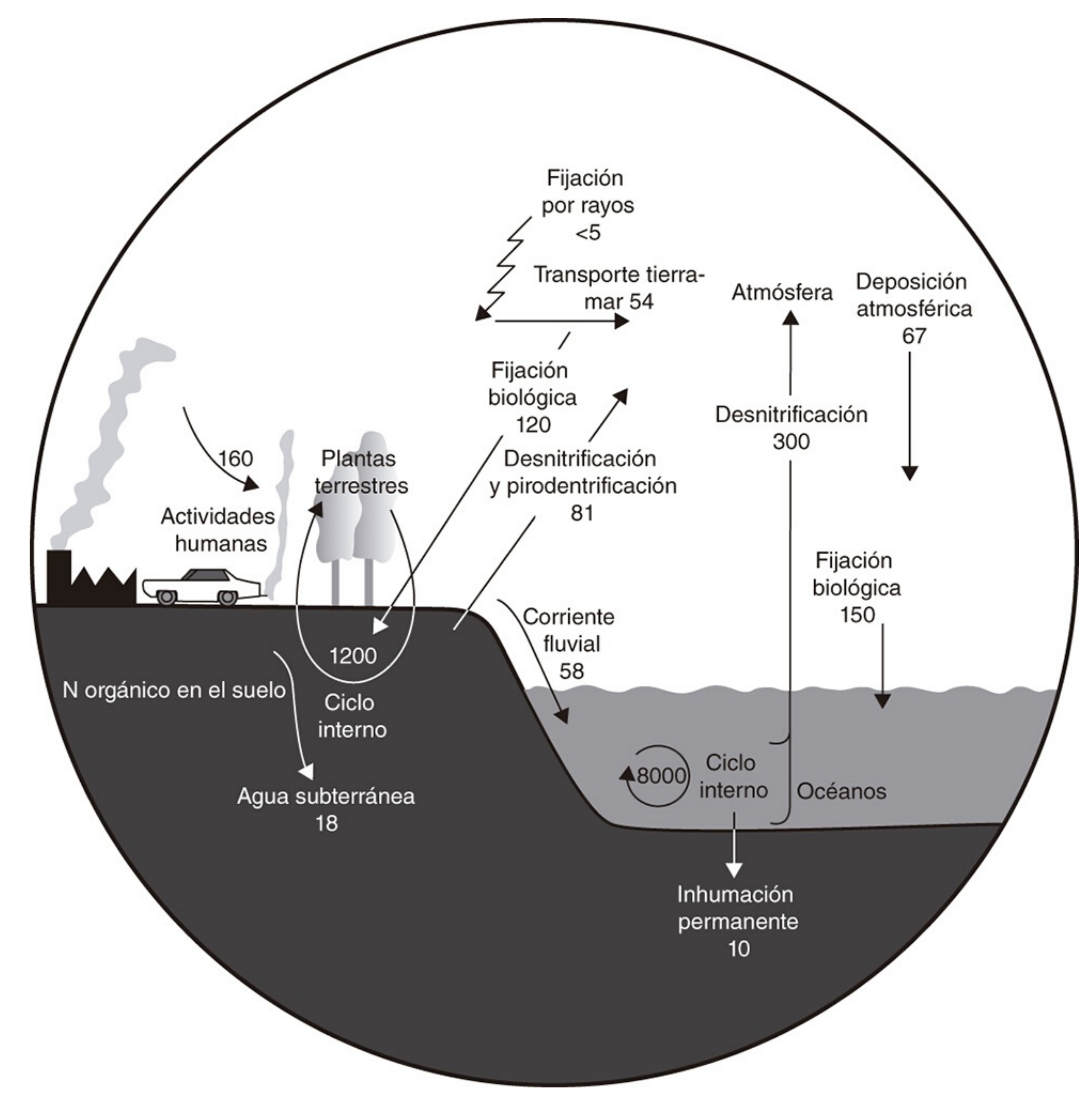
Haber fue galardonado con el premio Nobel en 1918, y el proceso de Haber-Bosch transformó el ciclo del nitrógeno en la Tierra. Mediante la combinación de grandes cantidades de energía y carbono (por lo común metano) con gas N_2, su proceso permitía fijar el nitrógeno en amonio listo para usar como fertilizante y con otros fines industriales, incluida la fabricación de bombas. Los fertilizantes nitrogenados sintéticos conllevaron un aumento drástico del rendimiento de las cosechas, a menudo multiplicándolo por dos o más, sobre todo cuando se desarrollaron variedades modernas de cultivos que los aprovechaban mejor (esta fue la base de lo que se conoce como Revolución Verde en agricultura, que se extendió por todo el mundo a partir de la década de 1950). Gracias a este rendimiento mucho mayor, la producción de cultivos creció sin necesidad de un incremento equivalente de las tierras de labor, por lo que la mayor parte de la expansión del uso de suelos agrícolas en el siglo XX se ha destinado a la producción ganadera. Al mismo tiempo, los fertilizantes nitrogenados, sobre todo cuando se aplican en exceso, han contaminado aguas subterráneas y superficiales con nitratos, con los consiguientes riesgos para la salud, y han saturado de nitrógeno los ecosistemas costeros, lo que ha dado lugar a estallidos de algas y zonas muertas. Las emisiones de óxido nitroso procedentes de los campos fertilizados son ahora una fuente cada vez más significativa de gases de efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra. Aparte de la fijación artificial del nitrógeno, la quema de carbón, petróleo y biomasa también libera formas ácidas de gases de nitrógeno, los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2), que junto con los óxidos de azufre producen la denominada lluvia ácida que causó daños ambientales generalizados en las décadas de 1980 y 1990, antes de que se regularan y controlaran estas emisiones ácidas procedentes de las centrales eléctricas de carbón y de los vehículos con motor.

La fijación artificial de nitrógeno para usarlo como fertilizante, los cultivos especializados para aprovechar el nitrógeno y la quema de combustibles fósiles fijan ahora, en conjunto, una cantidad de nitrógeno reactivo muy superior a la de todos los procesos naturales de la biosfera terrestre combinados (figura 16). A modo de comparación, si las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono superaran todas las emisiones naturales del planeta, tendrían que multiplicarse por 10. La alteración antropogénica del ciclo biogeoquímico global del nitrógeno es uno de los ejemplos más impactantes de la interferencia humana con el funcionamiento de la Tierra como sistema (figura 17). Antes del siglo XX el proceso industrial que está detrás de esta profunda transformación del sistema Tierra ni siquiera existía. Desde la década de 1950, la fijación artificial del nitrógeno se ha acelerado y ha ayudado a que la modificación humana del planeta haya alcanzado unos niveles sin precedentes.



16. Cambios globales en el nitrógeno reactivo (Nr) desde 1850.

(Tg = Teragramos = 10^{12} gramos).



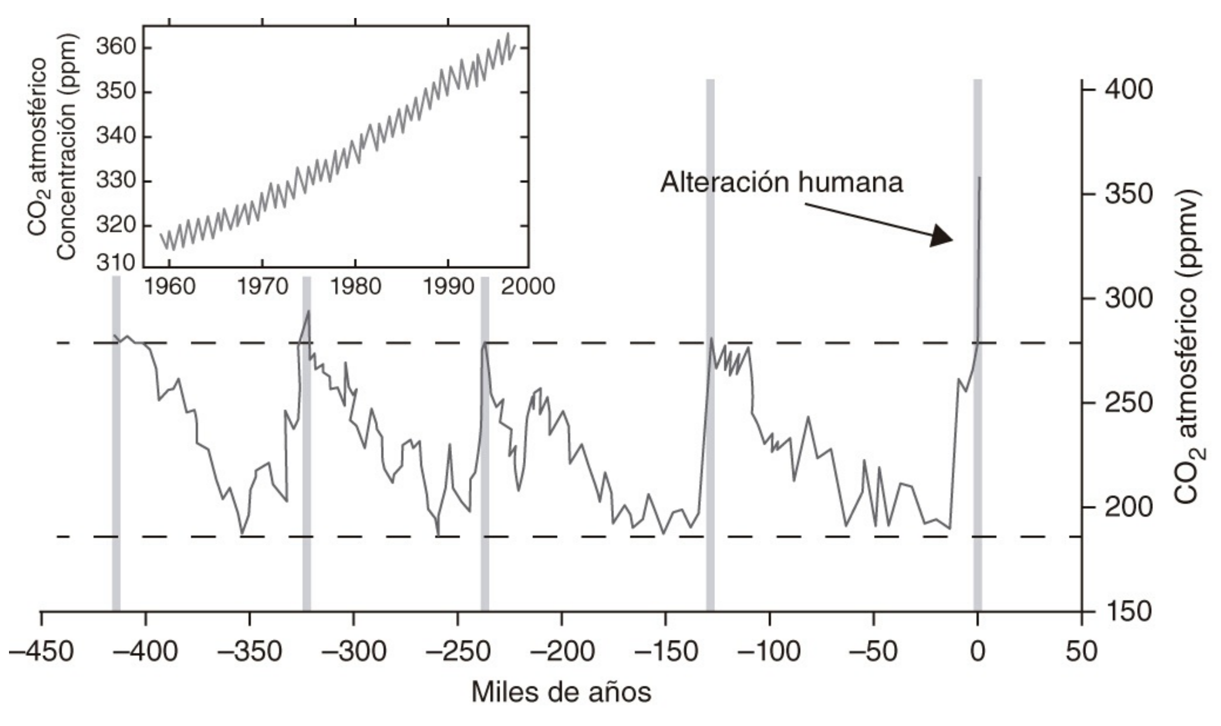
17. El ciclo global del nitrógeno (los números se expresan en Tg N).

Atmósfera y clima

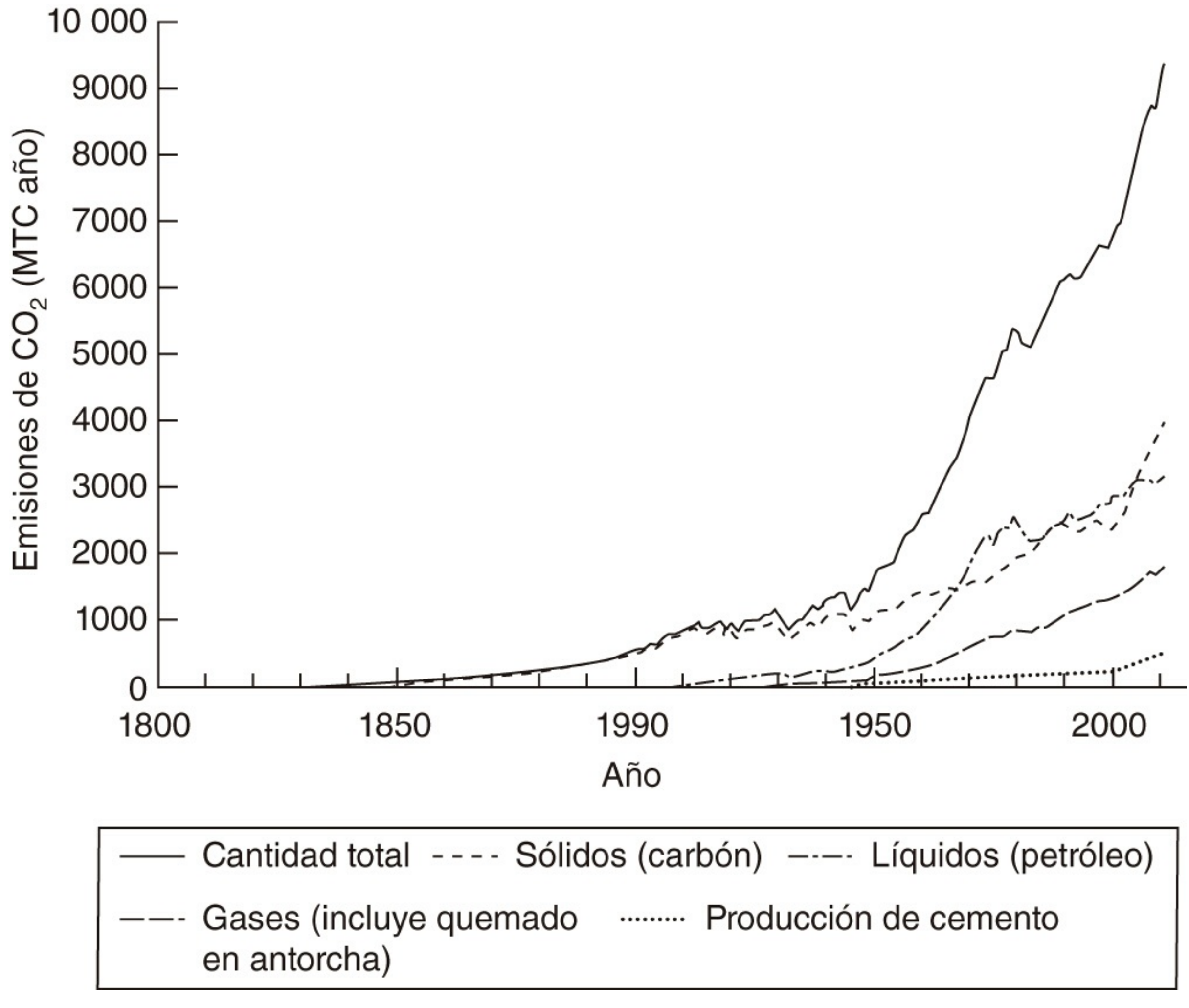
Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y su incidencia en la atmósfera y el clima de la Tierra son una de las pruebas más concluyentes de una transición planetaria acelerada causada por el ser humano. A partir de la curva de Keeling, se han monitorizado los cambios atmosféricos globales y también se han reconstruido en detalle hasta el pasado más remoto. El dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso experimentaron un incremento acusado a lo largo del último siglo hasta

alcanzar niveles sin precedentes en todo el Holoceno. Los CFC son la única excepción, ya que fueron en aumento desde la década de 1950 hasta la de 1990, cuando fueron retirados de forma gradual debido a acuerdos internacionales para proteger el ozono estratosférico, que ahora se está recuperando.

El dióxido de carbono atmosférico siempre ha variado mucho a lo largo del tiempo. Sin embargo, los cambios antropogénicos en las concentraciones de dióxido de carbono superan con creces su rango de variabilidad natural en la geología reciente (figura 18). Los niveles actuales de dióxido de carbono (>400 ppm) son casi con toda seguridad más elevados que los alcanzados en cualquier momento de los últimos 4 millones de años, o incluso más. El ritmo de cambio de la temperatura atmosférica también manifiesta una rapidez inusitada, y se está acelerando junto con las tasas de emisiones antropogénicas de dióxido de carbono desde 1950 (figura 19).



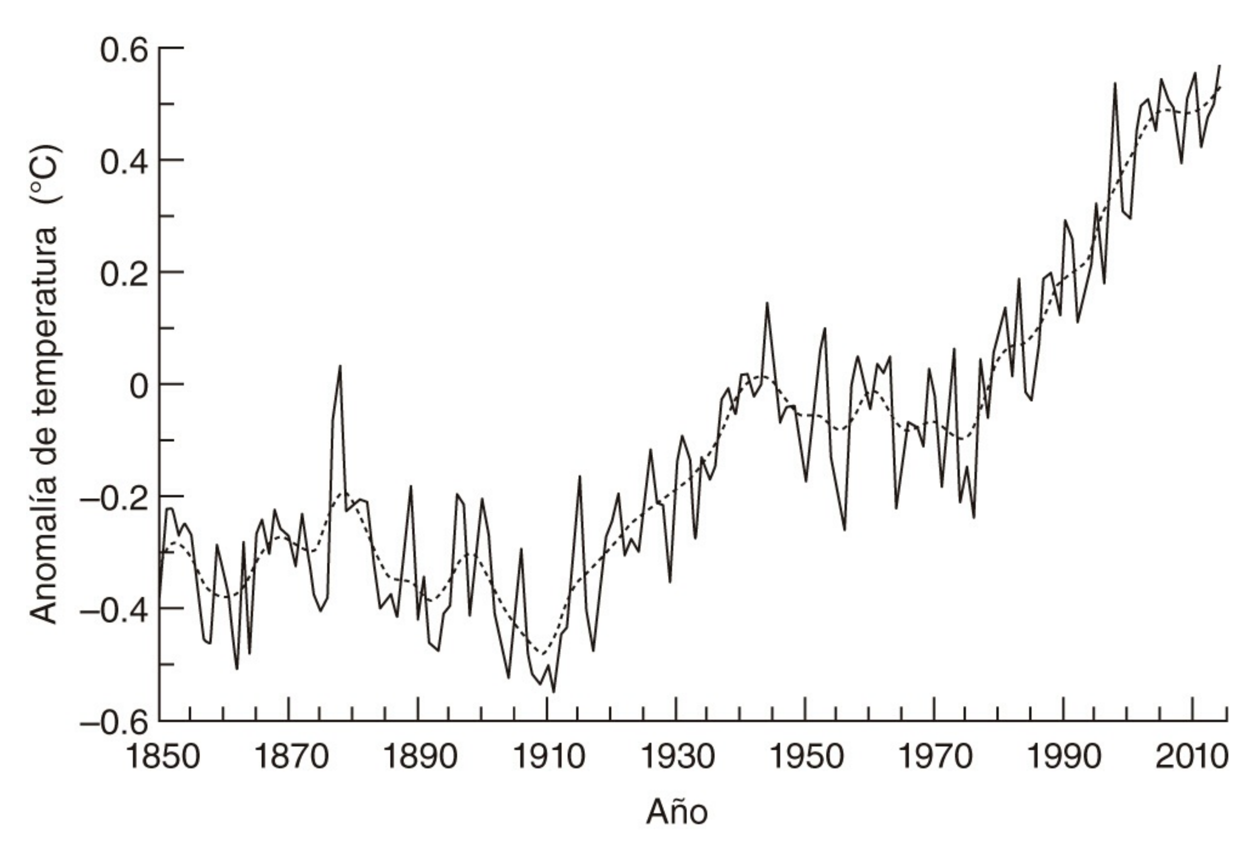
18. Variaciones del CO_2 atmosférico a lo largo de los últimos 450 000 años que ilustran su velocísimo incremento reciente por encima de los valores previos. El recuadro es la curva de Keeling, que detalla los cambios observados desde 1960.



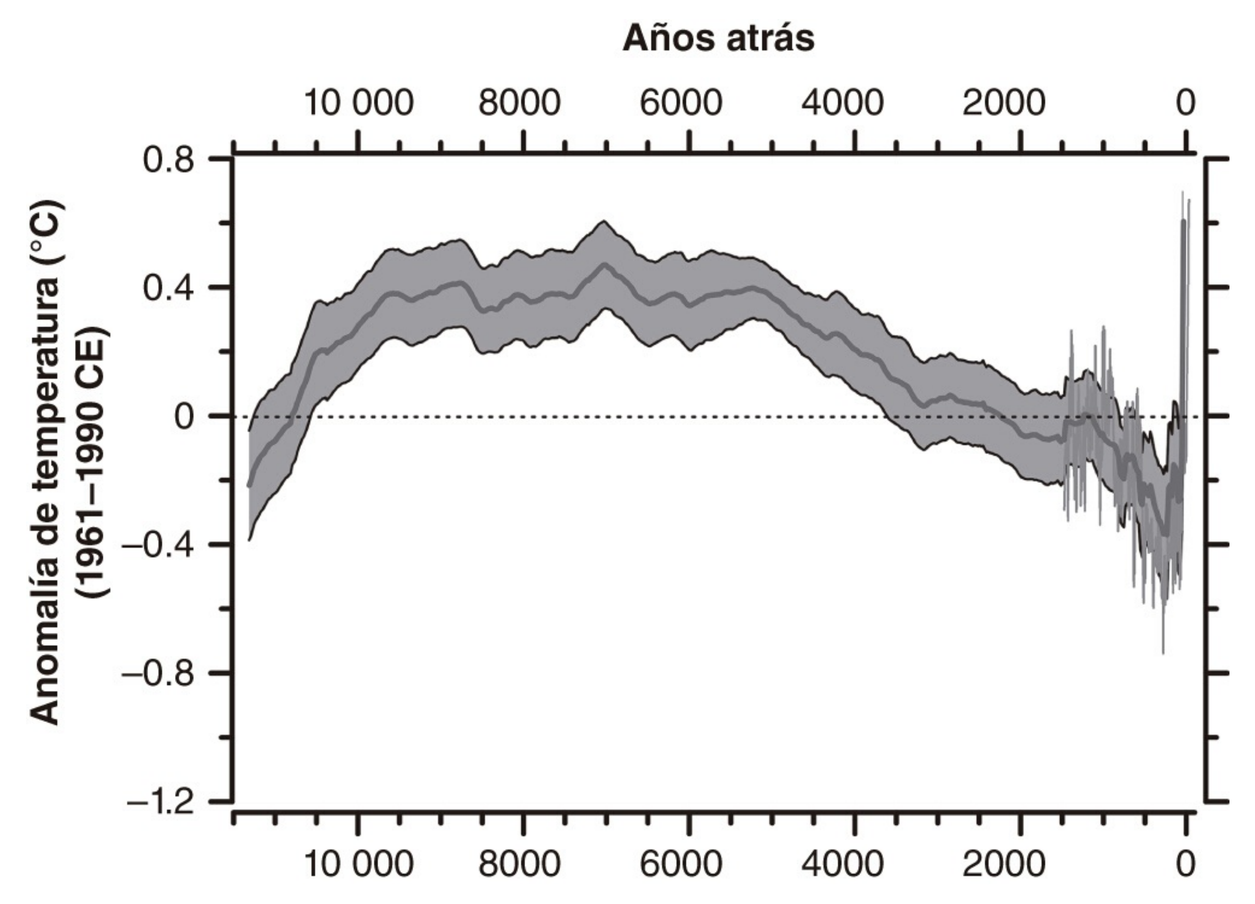
19. Cambios globales en las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono desde 1800 hasta 2000 procedentes de diversas fuentes, incluidos los combustibles fósiles y la producción de cemento.

Las subidas de la temperatura media de la superficie de la Tierra siguen de cerca los cambios antropogénicos del dióxido de carbono atmosférico y otros gases de efecto invernadero (figura 20). Esta estrecha correlación no hace más que sumarse a los signos que arrojan los modelos de simulación del sistema Tierra y que demuestran de manera sistemática que las subidas actuales de la temperatura planetaria no pueden explicarse mediante ningún proceso del sistema Tierra que no sea el aumento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. Además, las temperaturas medias mundiales son ahora bastante más elevadas que hace 100 años, y probablemente lo sean más que en ningún otro momento a lo largo de toda la época del Holoceno (figura 21). Y tanto las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero como las temperaturas siguen aumentando conjuntamente a un ritmo acelerado. Hasta es probable que mientras usted lee esto la Tierra albergue

una temperatura media más alta que en cualquier otro momento de los últimos 100 000 años o más.



20. Cambios globales en la temperatura superficial de la Tierra entre 1850 y 2000, expresados como diferencias respecto de la media de 1961 a 1990 («anomalías de temperatura»).



21. Cambios globales en la temperatura superficial de la Tierra a lo largo de todo el Holoceno (anomalía de temperatura en relación con la media de 1961 a 1990).

Puntos críticos

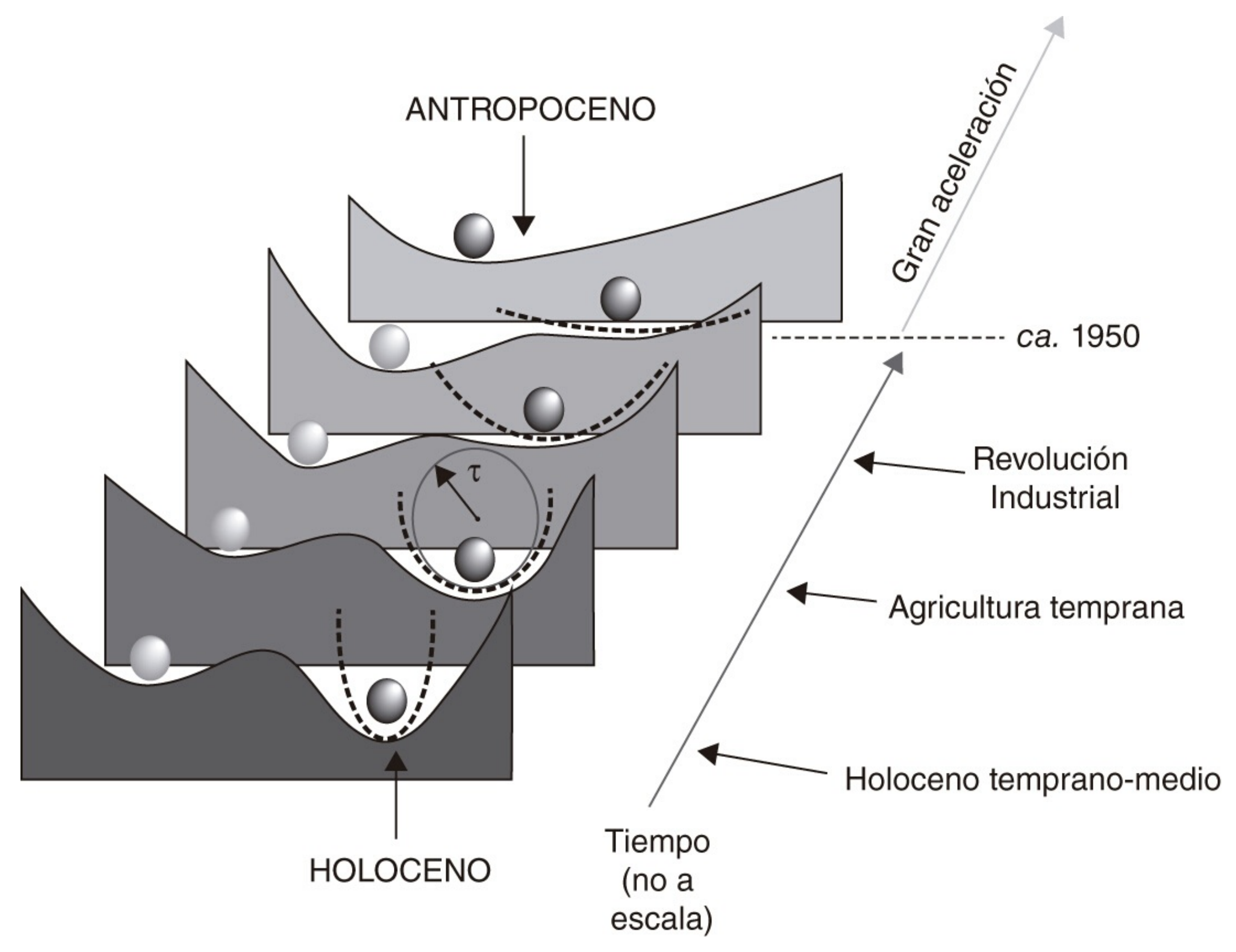
Los grandes cambios en el clima de la Tierra son la norma, no la excepción, en el Cuaternario, que incluye docenas de transiciones entre periodos glaciales e interglaciales. La Tierra también fue bastante más cálida durante el Eemiano, el último periodo interglacial antes del Holoceno, que terminó hace unos 115 000 años. Las temperaturas interglaciales relativamente estables y moderadas del Holoceno destacan, por tanto, como una isla de estabilidad climática en medio de un mar de valores extremos. Si el sistema climático de la Tierra abandonara este estado de relativa estabilidad, hay muchas razones para creer que las consecuencias podrían ser catastróficas tanto para las sociedades humanas como para la vida no humana tal como la conocemos. Ninguna sociedad industrial o incluso agrícola ha experimentado jamás cambios climáticos como los habituales antes del Holoceno. Y las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático no son ni mucho menos

las únicas alteraciones del sistema Tierra que se han acelerado desde la década de 1950.

La posibilidad de que se produzcan «cambios de régimen» veloces y transformadores en el clima de la Tierra está bien avalada por los patrones de comportamiento pretéritos del sistema Tierra. Un ejemplo de ello lo encontramos en las transiciones glaciales a interglaciales, cuando la subida de las temperaturas inducida por el aumento de la energía solar entrante y reforzada por las emisiones de carbono de la biosfera, la disminución de la cubierta de hielo marino y continental y otras retroacciones positivas internas impulsan cambios veloces en el clima. En estos casos, el calentamiento de la Tierra más allá de cierto umbral de temperatura, o punto crítico, desencadena en el sistema un proceso de cambio que se refuerza a sí mismo, lo que da lugar a un «cambio brusco» bastante veloz, no lineal y potencialmente irreversible, un cambio de régimen en el sistema climático de la Tierra. Aunque el cambio cíclico de la Tierra de periodos glaciales a interglaciales y viceversa representa un sistema «biestable» de dos estados, glacial e interglacial, también existen ejemplos de cambios de régimen unidireccionales en el sistema Tierra. Entre ellos se cuentan el rápido enfriamiento del planeta cuando grandes erupciones volcánicas o impactos meteoríticos lanzan polvo a la atmósfera que bloquea el paso de la luz del Sol, así como las alteraciones causadas por cambios evolutivos en la biosfera, entre los que destaca sobre todo la oxigenación de la atmósfera terrestre y la emergencia de la vida en el tierra firme.

El potencial de este cambio de régimen del Antropoceno ha preocupado a los científicos que estudian el sistema Tierra durante décadas. Los principios que subyacen a ese cambio se han ilustrado mediante la analogía de una bola que rueda por el interior de un cuenco. El estado del sistema Tierra, representado por la bola, se mueve dentro de su «rango natural» de variabilidad, representado por el cuenco, o «cuenca de atracción» (figura 22). Cuando el sistema es estable (principios y mediados del Holoceno), el cuenco es profundo y estrecho y los desplazamientos de la bola son rápidos pero limitados a un margen reducido. El cambio de sistema comienza cuando el cuenco se vuelve más somero y la bola tiene libertad para desplazarse con más amplitud, pero también más despacio. Los primeros cambios en el sistema Tierra causados por el aumento de la agricultura y los procesos industriales pudieron provocar ese aumento de la variabilidad. Con el tiempo, el sistema se aparta de forma permanente de su estado anterior y más estable (el Holoceno), y tiende hacia un estado nuevo y menos estable (el

Antropoceno). En este momento, lo único que está claro es que el sistema Tierra se encuentra en una trayectoria veloz que la aparta del Holoceno. Todavía es demasiado pronto para saber cómo podría ser en última instancia el estado del Antropoceno, incluida su estabilidad relativa y cuánto tiempo duraría comparado con el Holoceno.



22. Cambio de régimen del Antropoceno; representación mediante la analogía de la bola y el cuenco. El hueco de la derecha representa una cuenca de atracción estable (el Holoceno) y la bola de la derecha, el estado del sistema Tierra. El hoyo y la bola de la izquierda representan un estado potencial (el Antropoceno) del sistema Tierra. Con la presión antropogénica gradual, el cuenco se vuelve menos hondo y acaba desapareciendo por completo (un umbral sería *ca*. 1950), por lo que la bola rueda hacia la izquierda (el cambio de régimen) en la trayectoria del Antropoceno, hacia una posible cuenca de atracción futura.

A medida que aumentan la escala y la intensidad de las alteraciones humanas en la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera del planeta, sin duda crece también el riesgo de que se produzca un cambio de régimen antropogénico hacia un estado del Antropoceno del sistema Tierra. Por ejemplo, la veloz subida de las concentraciones de gases de efecto invernadero podría desplazar el planeta hacia un estado de «Tierra invernadero» extremadamente tórrido, algo más probable aún si se produce

una retroacción positiva. Por ejemplo, el calentamiento de los humedales del Ártico podría liberar un estallido de metano en la atmósfera, o el hielo marino podría desplomarse e incrementar la captación de calor por parte del océano y reducir la reflexión de energía solar al exterior del planeta. Hay muchas posibilidades, incluidas las respuestas desconocidas de una biosfera alterada por el ser humano. Además, ese cambio de estado podría ser gradual a lo largo de milenios o podría producirse con una rapidez sorprendente. En cualquier caso, es muy poco probable que el sistema climático de la Tierra vuelva o pueda volver al estado en el que se encontraba en el Holoceno aunque se eliminaran las presiones humanas.

Desde la perspectiva de la ciencia del sistema Tierra, los indicios de que el ser humano ha forzado su desplazamiento hacia un estado fuera de su rango natural de variabilidad son fundamentales para definir el Antropoceno como un nuevo intervalo de tiempo geológico. La posibilidad de que se produzca ese cambio de régimen del Holoceno al Antropoceno está avalada por la historia de la Tierra y también por las observaciones y modelos del funcionamiento de la Tierra como sistema. No obstante, aunque está claro que el sistema Tierra se ha desplazado fuera de las condiciones conocidas del Holoceno, los cambios prosiguen con tanta rapidez que aún no se conocen todas las características de un futuro estado del Antropoceno, más allá de que seguramente será más cálido y el nivel del mar será más alto.

Algo nuevo

Los cambios ambientales y sociales del último medio siglo pasado revelan una historia formidable de transformación planetaria por parte de las sociedades humanas. La superficie de la Tierra se ha alterado por la roturación para la agricultura y los asentamientos humanos. Los ríos se han represado y las corrientes hidrológicas se han reubicado dentro de la hidrosfera. Los seres humanos han remodelado la biosfera desplazando la flora y la fauna por todo el mundo y provocando la extinción de especies por la pérdida de hábitat y la sobreexplotación. Los ciclos biogeoquímicos globales del carbono, el nitrógeno y otros elementos clave se han transformado mediante la quema de combustibles fósiles, la síntesis industrial de fertilizantes nitrogenados y otras actividades humanas cuyos efectos van desde la contaminación generalizada hasta el cambio climático. Como resultado, los seres humanos han dejado su huella en casi todas las esferas del sistema Tierra. Es posible que el clima del planeta se haya desviado ya de

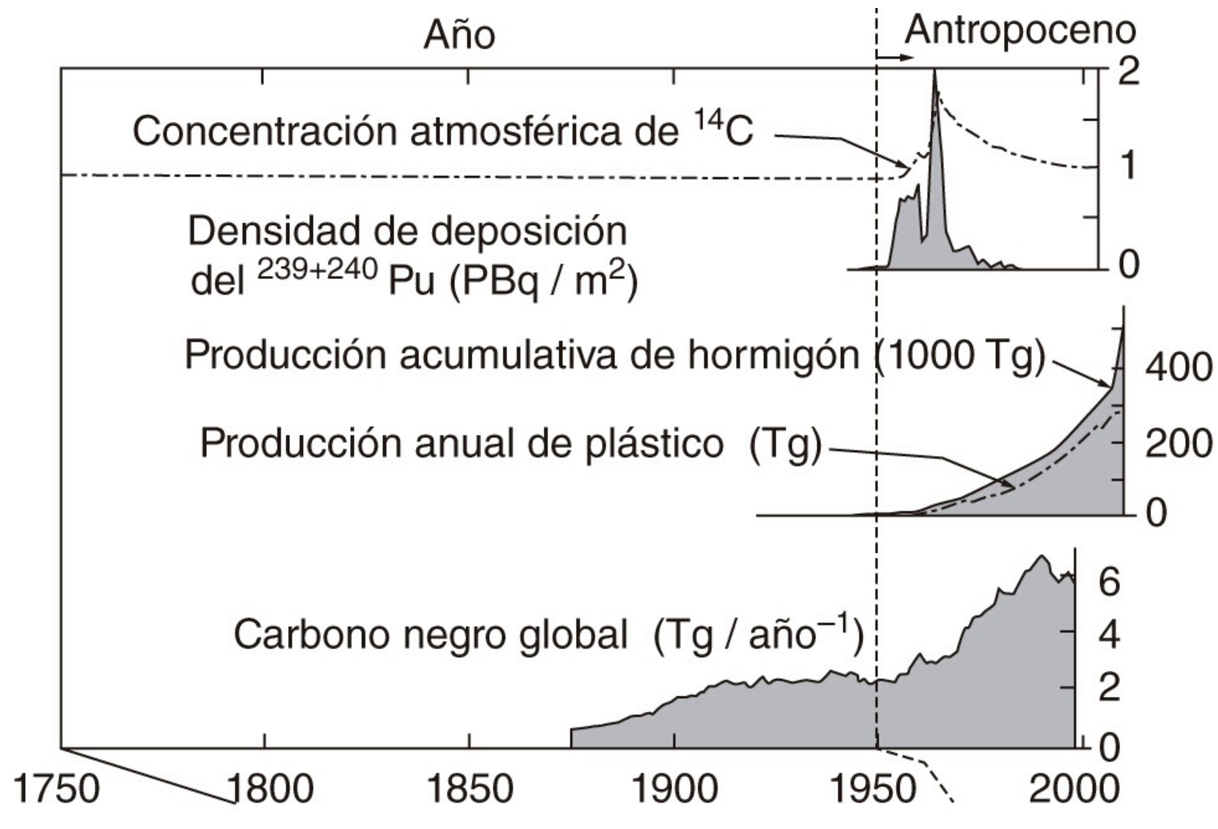
forma irreversible hacia un estado sin precedentes, de consecuencias desconocidas y tal vez catastróficas para las sociedades humanas.

Con la obra *A Planet Under Pressure* y otros trabajos posteriores, Will Steffen y la comunidad del IGBP instauraron «la gran aceleración» como la interpretación científica imperante del cambio ambiental global inducido por el ser humano, y establecieron una estrecha relación entre ella y la transición de la Tierra hacia una «era del Antropoceno». Sin embargo, la misma aceleración espectacular que sorprendió a los estudiosos del sistema Tierra ya era conocida por los historiadores ambientales, en especial por John McNeill. Su clarividente libro del año 2000 *Something New Under the Sun* [«Algo nuevo bajo el Sol»] documentó una variación sin precedentes en la escala e intensidad del cambio social y medioambiental en el siglo XX, junto con su aceleración a partir de 1950. Steffen, Crutzen y McNeill unieron fuerzas más tarde y asentaron aún más la gran aceleración como la explicación principal de la emergencia del ser humano como «gran fuerza de la naturaleza» y la transición del sistema Tierra hacia el Antropoceno a partir de 1950.

La gran aceleración explica la transición hacia el Antropoceno a través de una narrativa compleja y multicausal que entrelaza los cambios sociales, políticos y económicos del ser humano con sus diversas implicaciones ambientales desde la escala local a la global, incluyendo las interacciones entre estos cambios a través de las distintas escalas. Aunque admite que las alteraciones humanas comenzaron hace mucho tiempo, la gran aceleración sostiene que las perturbaciones humanas del medio ambiente antes del siglo XX, aun siendo significativas en algunas regiones, permanecieron «bien dentro de los límites de la variabilidad natural del medio ambiente» a escala planetaria. Las sociedades preindustriales nunca produjeron las escalas o intensidades de los cambios ambientales antropogénicos necesarios para «rivalizar con las grandes fuerzas de la naturaleza». El Antropoceno no comenzó con la emergencia de la agricultura, ni tan siquiera con la Revolución Industrial, sino con el auge de las sociedades industriales a gran escala después de 1945 y su capacidad sin precedentes para alterar el medio ambiente planetario a un ritmo galopante. A mediados del siglo XX, la presión humana alcanzó unos niveles capaces de inducir un cambio de régimen antropogénico en el funcionamiento del sistema Tierra.

En un artículo publicado en 2016 en la revista *Science*, el Grupo de Trabajo del Antropoceno apoyó la gran aceleración como la principal explicación científica de la transición de la Tierra hacia el Antropoceno. Una vez instaurada esta interpretación, el AWG se centró en la búsqueda de

huellas estratigráficas de los cambios antropogénicos clave asociados a la transición hacia el Antropoceno a mediados del siglo XX. Entre los principales candidatos se encontraban los depósitos de lluvia radiactiva derivados de las pruebas con armas nucleares (plutonio y carbono-14) que comenzaron en 1945 y alcanzaron su punto álgido entre 1963 y 1964. Otro indicador popular lo representaron los depósitos de plásticos, y otro más fue el carbono negro, producido por la combustión incompleta de los combustibles fósiles (figura 23). La búsqueda de la mejor huella estratigráfica y del GSSP asociado a los galopantes cambios antropogénicos de mediados del siglo XX todavía continúa.



23. Nuevos marcadores del cambio antropogénico, como el hormigón, los plásticos, el carbono negro mundial y la lluvia de plutonio (Pu), junto con la concentración de radiocarbono atmosférico (^{14}C).

5. Ánthrōpos

«¿En qué momento exacto llegó el ser humano a dominar el medio ambiente de la Tierra?», se preguntaron los arqueólogos Bruce Smith y Melinda Zeder en 2013 en la revista *Anthropocene*. Más de una década después de la llamada a las armas de Crutzen, los arqueólogos acometieron su primer intento para definir el Antropoceno.

Los arqueólogos son los estratígrafos del universo humano, especializados en leer los registros materiales dejados por las sociedades humanas durante un periodo de tiempo prolongado, a menudo desde sus primeros comienzos. Y, al igual que los estratígrafos de la geología, los arqueólogos son los custodios del tiempo humano, dedicados a reconstruir la historia social y medioambiental de las sociedades humanas a partir de los registros físicos que han dejado tras de sí. En el transcurso de décadas, sus investigaciones han acumulado un conjunto impresionante de pruebas que demuestran que el ser humano ha alterado de manera drástica los entornos terrestres de todo el mundo desde finales del Pleistoceno.

Con pruebas tan sólidas de que los humanos han transformado la Tierra, tal vez sorprenda que los arqueólogos hayan tardado tanto en analizar el Antropoceno. Lo cierto es que el llamamiento para reconocer una nueva época humana podría haber surgido desde dentro de la propia arqueología. Pero Smith y Zeder aportan buenas razones para explicar por qué no fue así. Desde su perspectiva como arqueólogos, el inicio del Antropoceno no debe definirse tan solo por las consecuencias ambientales de las actividades humanas, sino por la aparición de capacidades humanas sin precedentes para alterar los ecosistemas de la Tierra.

Ingenieros supremos del ecosistema

Todos los organismos alteran el entorno por el mero hecho de ocupar un espacio, y más aún al alimentarse y mantenerse. Pero algunas especies, conocidas como «ingenieros del ecosistema», influyen más en él. Estas especies, como los castores que construyen presas y las lombrices que

horadan la tierra, tienen comportamientos que alteran el medio y cambian profundamente las condiciones ambientales para sí mismas y para otras especies de su entorno. Cuando estas alteraciones ambientales potencian o reducen considerablemente su capacidad para sobrevivir y reproducirse, pueden considerarse una «herencia ecológica», parte de un proceso evolutivo denominado «construcción de nicho» con el que los organismos reproducen las condiciones ambientales que necesitan para poder vivir.

Tal como señaló Bruce Smith en *Science* en 2007, los seres humanos son los ingenieros supremos del ecosistema. Ninguna otra especie individual ha adquirido la capacidad de realizar una variedad tan diversa de comportamientos que alteran sobremanera el medio ambiente, desde despejar el territorio con fuego hasta domesticar otras especies o cultivar el suelo. Esta capacidad excepcional para construir su propio nicho ha ayudado a las poblaciones humanas a prosperar y crecer más allá de las restricciones naturales del entorno que han limitado a otras especies de organismos. En opinión de Smith, Zeder y de un número de arqueólogos cada vez mayor, la creciente capacidad humana para construir nichos es la causa última de la transición de la Tierra hacia el Antropoceno.

Ancestros

Los primeros registros de capacidades humanas excepcionales para alterar el entorno son muy anteriores a la existencia del ser humano como especie. De hecho, cuando apareció el *Homo sapiens* unos 300 000 años atrás en África, apenas había nada que lo diferenciara de otras especies del género *Homo*, salvo su anatomía. Aquellos primeros «humanos anatómicamente modernos» eran bastante menos robustos que sus antepasados, con una estructura más ligera, mandíbulas y dientes más pequeños y un cráneo más redondeado. Y aunque tenían el cerebro más grande que las especies predecesoras, en general eran más pequeños que los individuos de una especie de *Homo* más robusta y coetánea: los neandertales (*Homo neanderthalensis*).

A lo largo de decenas de miles de años, los humanos fabricaron herramientas de piedra, utilizaron el fuego y vivieron de un modo muy similar al de sus antepasados y sus primos, los neandertales. Las primeras herramientas de piedra habían sido obra de nuestros antepasados lejanos del género *Australopithecus* hace más de 3.3 millones de años, o incluso antes. Las primeras herramientas de piedra fabricadas por *Homo sapiens* se parecen mucho a las hachas de mano confeccionadas 1.6 millones de años antes por

nuestros antepasados del género *Homo*. El uso controlado del fuego está bien documentado más de 400 000 años atrás, y pudo comenzar hace 2 millones de años o incluso antes. Está claro que los «ingenieros supremos del ecosistema» heredaron uno o dos trucos de sus ancestros.

Hace más de 100 000 años que el ser humano empezó a construir herramientas cada vez más diferenciadas de las de sus predecesores, con materiales novedosos, como huesos, otros métodos de fabricación y diseños más complejos. Grabaron marcas simbólicas en conchas y huesos, confeccionaron y usaron joyas, y pintaron su cuerpo y sus viviendas en cuevas con ocre (un mineral rico en hierro) y carbón. Practicaron el trueque a largas distancias con los materiales necesarios para fabricar herramientas y adornos, como sílex, obsidiana y conchas marinas. Sus asentamientos se volvieron más grandes y complejos. Y las estrategias sociales de caza y búsqueda de alimentos evidenciaron un grado de eficacia absolutamente nuevo. Durante un período de varias decenas de miles de años, los humanos fueron acumulando un conjunto diverso de comportamientos «modernos» y complejos, socialmente aprendidos y aceptados, y dejando huellas materiales evidentes de estos comportamientos en yacimientos por toda África. A finales del Pleistoceno, hace más de 60 000 años, estos complejos registros materiales empezaron a arrojar signos de que nuevas formas de sociedades humanas «conductualmente modernas» estaban desarrollando unas capacidades sociales superiores a las de cualquier otra especie anterior en la historia de la Tierra.

La primera gran aceleración

El desarrollo y la acumulación de comportamientos humanos modernos marcaron un cambio importante a largo plazo en las capacidades humanas para la construcción de nichos. Surgieron métodos nuevos para fabricar herramientas, estrategias nuevas para modificar y aprovechar el entorno y nuevas formas de cooperación. Y más adelante todo eso se aprendió de otros y se transmitió a las generaciones futuras gracias, en parte, a un uso cada vez más sofisticado de las lenguas. Los seres humanos empezaron a vivir en un mundo cada vez más social donde la supervivencia diaria dependía de comportamientos aprendidos socialmente y adoptados en cooperación con otros.

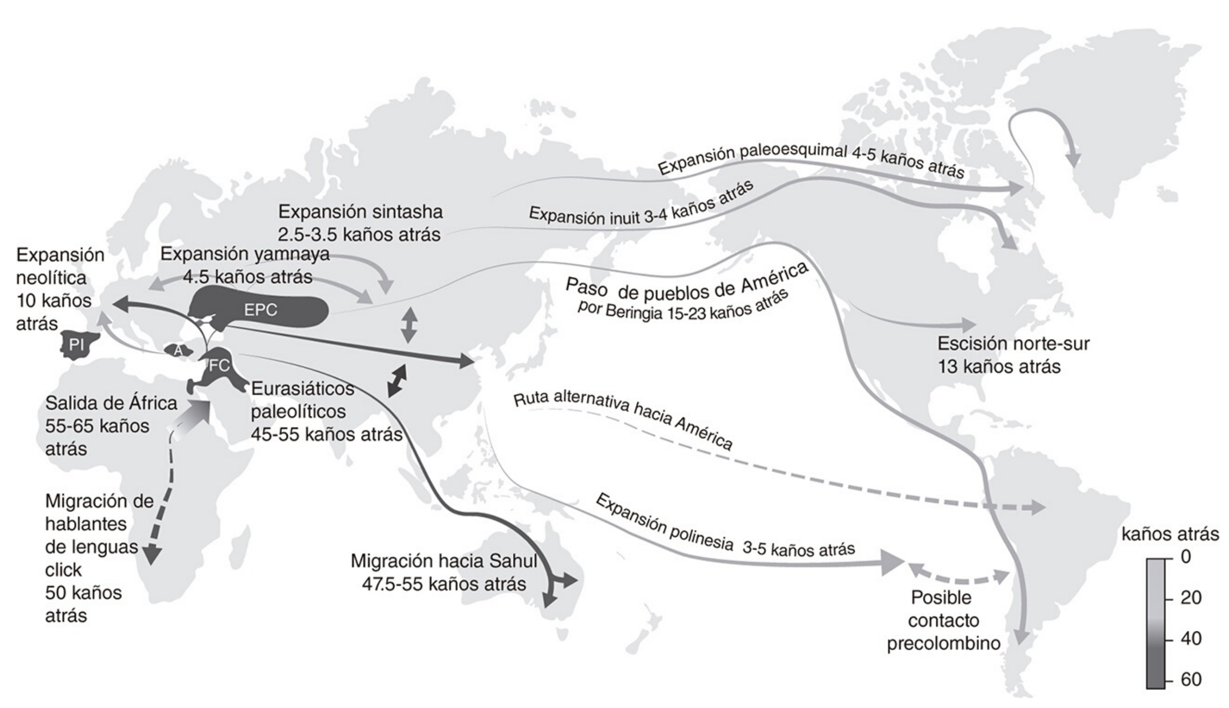
Los conocimientos adquiridos mediante el aprendizaje social (la cultura) se volvieron esenciales para recolectar las especies adecuadas (no las

venenosas), para fabricar las mejores herramientas (incluidos proyectiles con punta de piedra para cazar) y para alterar entornos de maneras cada vez más transformadoras, incluyendo la construcción de trampas, embalses y desvíos de rocas para facilitar la caza y la pesca. Las interacciones e intercambios sociales complejos se convirtieron en algo fundamental para satisfacer las necesidades vitales, desde las estrategias sociales de cooperación para cazar y recolectar alimentos y repartir los recursos, hasta el comercio a larga distancia de ocre, materiales para confeccionar herramientas de piedra (sílex, obsidiana) y joyas (conchas, plumas), así como estrategias novedosas para intercambiar alimentos más allá de las clásicas relaciones biológicas de parentesco. Igual que ocurrió con la ingeniería de los ecosistemas y el intercambio social, también empezaron a evolucionar formas de interacción social cada vez más diversas y con más rapidez mediante procesos de evolución cultural que incluyeron relaciones jerárquicas complejas y roles especializados, desde funciones ceremoniales de chamán hasta el surgimiento de agrupaciones sociales más amplias, incluidas sociedades tribales con distintos niveles de liderazgo superiores a los pequeños grupos igualitarios, o bandas, que caracterizaron a las primeras sociedades humanas. Es muy probable que el desarrollo de las lenguas humanas fuera esencial para ello al incrementar la fidelidad de transmisión de la información cultural dentro de la sociedad y entre distintas generaciones.

A medida que la información transmitida socialmente, o la cultura, se iba acumulando, también experimentó una evolución. A finales del Pleistoceno, la construcción de nichos por parte del ser humano dio lugar a una rica variedad de herramientas y técnicas para habitar, aprovechar y modificar gran diversidad de entornos. Las sociedades humanas también se volvieron cada vez más capaces de realizar esfuerzos sociales cooperativos, incluyendo escalas más altas de actividad coordinada para aprovechar y modificar el entorno. Pertrechados de estas nuevas capacidades sociales, los humanos empezaron a salir de África en múltiples oleadas de emigración hace más de 60 000 años, llevando consigo la capacidad social de modificar el mundo (figura 24). Si bien las primeras sociedades humanas con un comportamiento moderno probablemente se desarrollaron en África, su expansión por toda la Tierra pronto convertiría al *Homo sapiens* en una especie planetaria. Hace 14 000 años, antes del fin del Pleistoceno y del comienzo del Holoceno, había poblaciones humanas afincadas en todos los continentes excepto la Antártida.

Defaunación

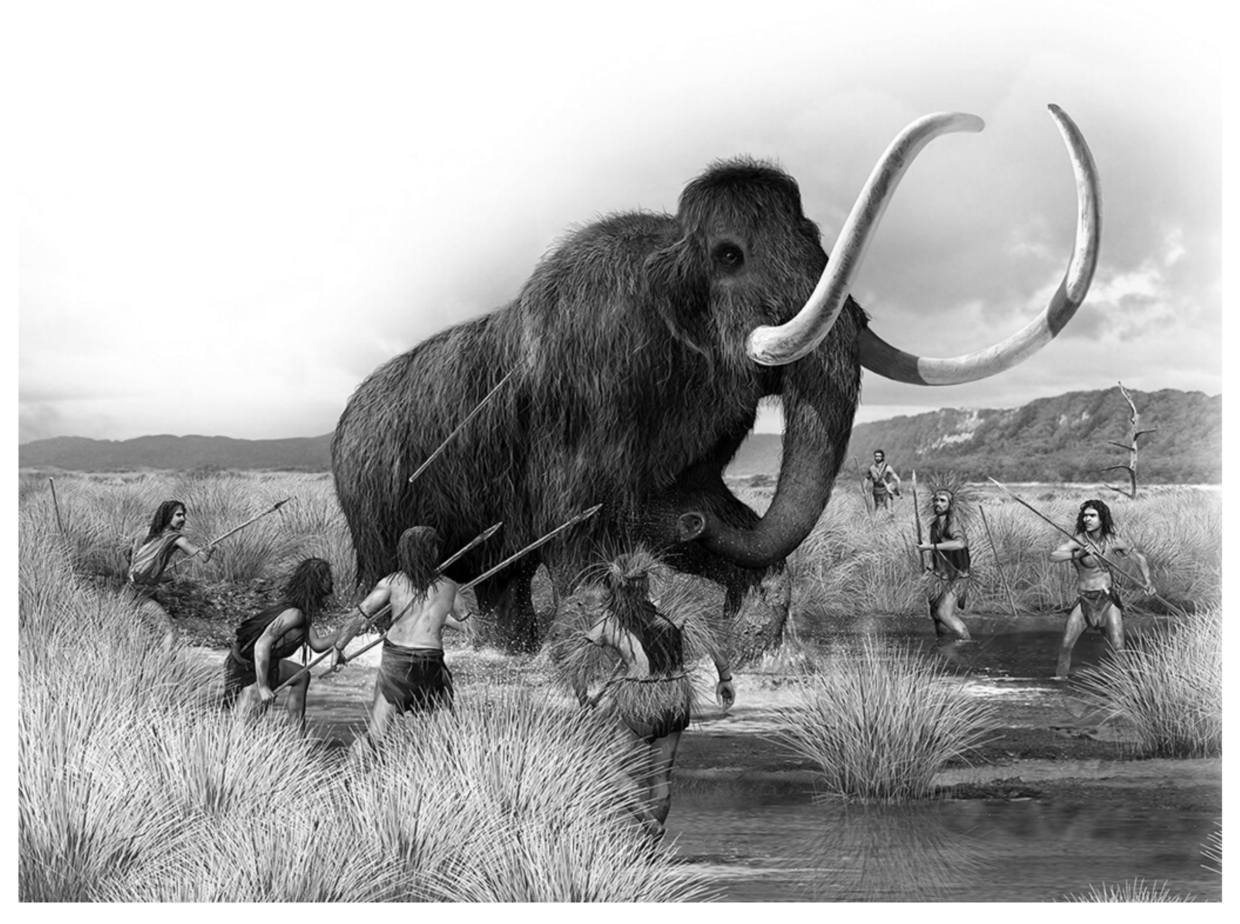
Las sociedades humanas dejaron signos de su llegada allá donde fueron, con depósitos de carbón, herramientas y otros artefactos, así como los huesos y otros restos de sí mismos y de las especies que cazaban o recolectaban. A medida que las diferentes sociedades de cada región se fueron adaptando a los nuevos entornos, aparecieron nuevos diseños de herramientas y nuevas formas de vida. Las sociedades de cazadores-recolectores aprendieron a capturar y consumir una diversidad cada vez mayor de especies, lo que amplió el nicho humano. Entre estas especies nuevas se encontraban muchas que jamás evolucionaron para convivir con primates que manejaban herramientas, utilizaban el fuego, cazaban en sociedad y construían su propio nicho. Muchas de estas especies, en especial los animales más grandes y más apreciados como presas (la megafauna), no tardaron en extinguirse, desde el gliptodonte, un pariente gigante del armadillo, hasta los perezosos terrestres del tamaño de un elefante del género *Megatherium*.



24. Mapa de la diáspora humana fuera de África que ilustra múltiples migraciones a lo largo del tiempo por los distintos continentes. PI: Península Ibérica; A: Anatolia; CF: Creciente Fértil; EPC: Estepa Ponto-Caspiana.

En el Pleistoceno tardío y el Holoceno temprano es probable que los pueblos cazadores-recolectores causaran la extinción de aproximadamente la mitad de los mamíferos de gran tamaño de la Tierra y de varias especies de

aves grandes en Australia. En América y Australia fue donde se perdieron más especies, entre el 70 % y casi el 90 % de toda su megafauna de mamíferos, mientras que Eurasia perdió menos del 40 % y África tan solo alrededor del 20 %. Es probable que estas diferencias regionales reflejen su historia de exposición previa al género *Homo*; la fauna de África y Eurasia evolucionó junto con los humanos. En América y Australia, la megafauna no tuvo tanta suerte; sin experiencia previa, se enfrentó de repente al depredador más exitoso de la Tierra, dotado de armas de proyectil, fuego y la capacidad de coordinar estrategias de caza en grandes grupos (figura 25).



25. Caza social de un mamut lanudo con proyectiles con punta de piedra.

El grado en que los cazadores-recolectores humanos provocaron la extinción masiva de la megafauna sigue siendo objeto de debate entre los científicos. Una de las extinciones de megafauna más intrigantes es la de nuestros parientes más cercanos, los neandertales, que coexistieron e incluso se aparearon con nosotros durante miles de años tras la llegada de los humanos a Eurasia, y cuya extinción funcional ocurrió tan solo unos 40 000

años atrás. La competencia es una de las explicaciones posibles; otra serían las enfermedades, y otra, el cambio climático. Los cambios climáticos se consideran responsables, al menos en parte, de numerosas extinciones de megafauna, ya que los intervalos fríos de finales del Pleistoceno y principios del Holoceno coincidieron con las llegadas del ser humano. Sin embargo, estas mismas especies ya habían sobrevivido a decenas de ciclos glaciales e interglaciales sin extinguirse. Es probable que el cambio climático unido a la depredación humana se convirtiera en un motor de extinción muy potente. El uso del fuego por parte del ser humano también pudo contribuir a ello, ya que incrementaría la frecuencia y la extensión de los incendios en las regiones más secas, lo que alteraría y modificaría los hábitats naturales como consecuencia involuntaria del uso del fuego.

Los cazadores-recolectores actuales también utilizan el fuego de forma intencionada para despejar bosques densos y aumentar la productividad del sotobosque, lo que atrae a la caza y favorece el éxito en esta actividad y en la recolección de frutos. Los primeros cazadores-recolectores pudieron emplear métodos similares para remodelar la vegetación del territorio. Además, la desaparición de megaherbívoros y megacarnívoros también remodela el desarrollo de la vegetación. Por ejemplo, la extinción del mamut lanudo causada por el ser humano pudo reducir la presión sobre la vegetación boscosa y dar lugar a la regeneración de esta vegetación en las vastas praderas septentrionales de la «estepa del mamut»; tanto las praderas como los mamuts desaparecieron más o menos al mismo tiempo. Incluso hay signos creíbles de que la pérdida de la dispersión de semillas que realizaba la megafauna (algunos árboles producen semillas demasiado grandes para dispersarse mediante especies más pequeñas) pudo limitar la regeneración de numerosas especies arbóreas altamente productivas, lo que habría reducido la captación de carbono por parte de los bosques.

¿Un Antropoceno megafaunístico?

Un sólido conjunto de pruebas confirma ahora que los cazadores-recolectores humanos alteraron drásticamente los patrones de flora y fauna en toda la Tierra en los últimos 50 000 años del Pleistoceno tardío y a principios del Holoceno. También hay signos que indican que la pérdida de megafauna y el uso del fuego pudieron transformar la cubierta vegetal en todos los continentes hasta tal punto que conllevara una alteración significativa del clima planetario. Un incremento veloz de la vegetación boscosa absorbe el

dióxido de carbono atmosférico y provoca un enfriamiento. Sin embargo, la vegetación boscosa densa, al igual que los océanos, también es más oscura que las zonas áridas y cubiertas de nieve y, por tanto, provoca un calentamiento, puesto que absorbe más energía del Sol. Este calentamiento se ve potenciado por los intercambios de humedad y energía entre la vegetación y la atmósfera. Incluso hay indicios de que la liberación de metano derivada del sistema digestivo de la megafauna podría haber calentado considerablemente la Tierra, de tal manera que su pérdida pudo enfriar el planeta hacia el final del Pleistoceno.

Múltiples propuestas científicas tienden ahora a admitir las consecuencias medioambientales globales de las extinciones de megafauna y el aumento del régimen natural de los incendios causados por el ser humano, sobre todo en América, como base para fechar el comienzo del Antropoceno hacia el final del Pleistoceno, hace unos 14 000 años. Aunque estas propuestas de un Antropoceno tan dilatado resultan curiosas y sugerentes a la vez, están cuestionadas por múltiples deficiencias. Hay pocas dudas de que las extinciones de megafauna provocadas por el ser humano alteraron el funcionamiento ecológico en múltiples continentes y tuvieron una incidencia considerable en el comportamiento de la biosfera terrestre. Sin embargo, las pruebas que respaldan la afirmación de que esto también alteró el clima de la Tierra y su funcionamiento como sistema, tanto empíricas como obtenidas con modelos de simulación climática, siguen distando mucho del umbral necesario para convencer a la mayoría de los científicos. Además, las extinciones de megafauna y las variaciones de la vegetación causadas por la humanidad se asemejan a las acaecidas antes de la aparición del ser humano y son muy diacrónicas. Por tanto, es muy improbable que estos cambios permitan al fin la identificación de un clavo dorado que permita establecer una correlación temporal en diferentes lugares de todo el mundo.

Agricultura

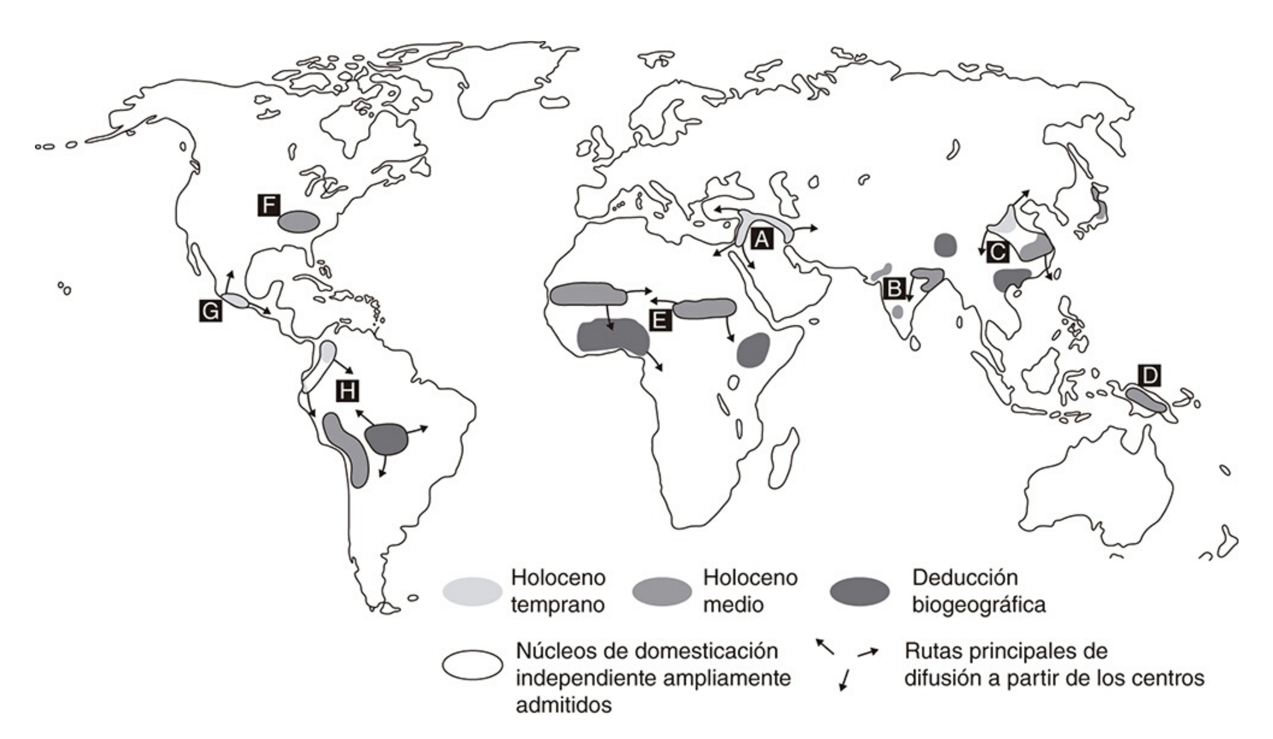
Cuando los cazadores-recolectores humanos extendieron su construcción de nichos por todo el planeta, empezaron a transformar la biosfera. Sin embargo, aquellas primeras alteraciones palidecen frente a las que vinieron después. Según Smith y Zeder, es el «proceso de domesticación… lo que proporciona la huella arqueológica de la gran manipulación humana de los ecosistemas terrestres y el inicio del Antropoceno». El surgimiento y la expansión de las

sociedades agrícolas desencadenaron un proceso global de cambio ambiental transformador que continúa hasta hoy.

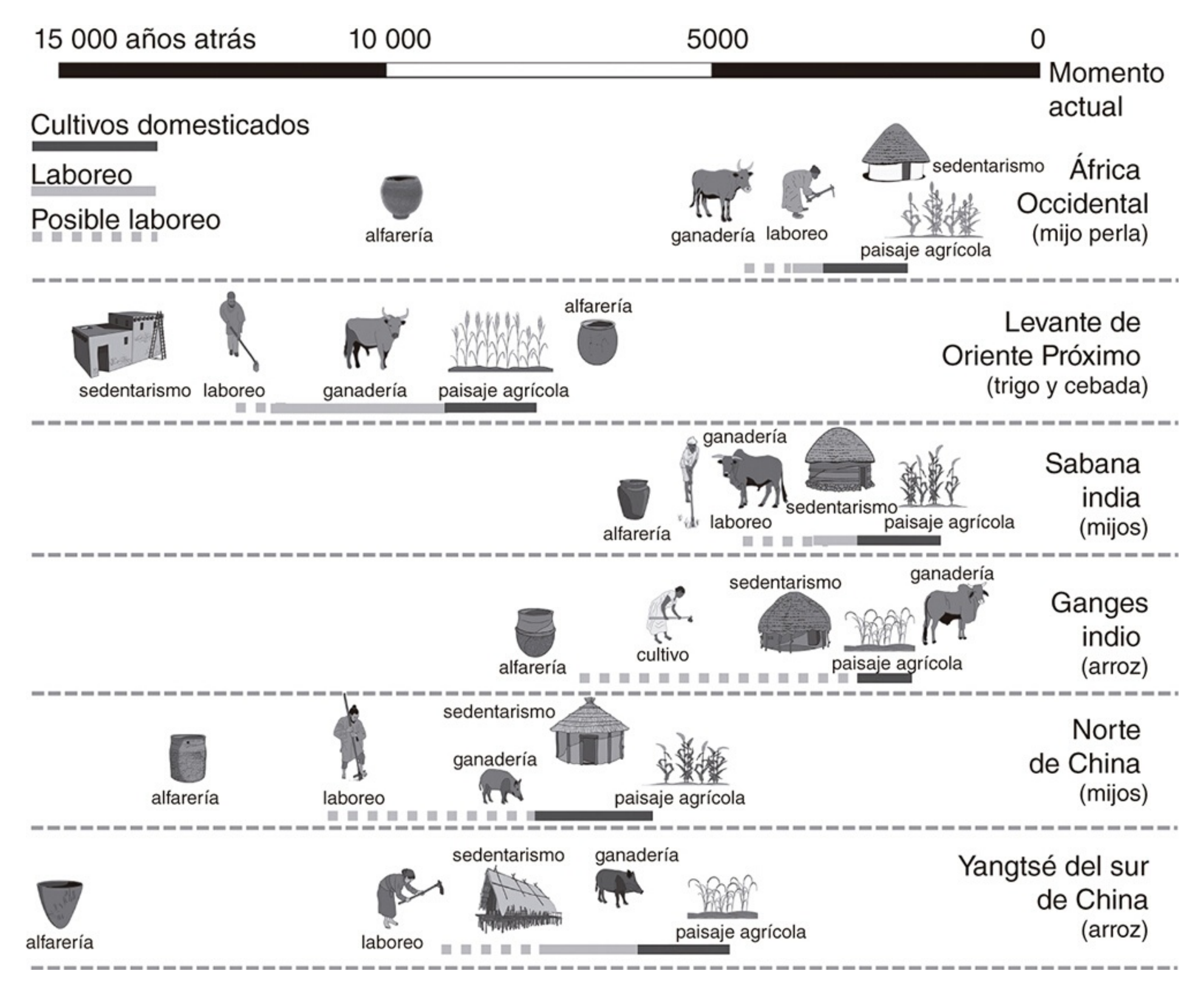
La agricultura evolucionó a partir de las prácticas pre y protoagrícolas de los cazadores-recolectores para construir nichos. A medida que crecían las poblaciones y que la cultura se iba acumulando, los grupos de cazadores-recolectores desarrollaron una serie de comportamientos sociales aprendidos que les permitieron mejorar la productividad del entorno y también los ayudaron a adaptarse a los cambios ambientales introducidos por sus antepasados. Cuando sus especies de megafauna preferida, y otras especies, se volvieron raras o extintas, los grupos de cazadores-recolectores aprendieron a aprovechar otras diferentes y con ello ampliaron su dieta y su nicho. Quemaron vegetación para favorecer un nuevo crecimiento. Aprendieron a potenciar el rendimiento nutricional de la caza y los víveres recolectados cocinando, moliendo y procesando con eficacia los alimentos animales y vegetales, con lo que lograron dar utilidad a los pequeños granos y tubérculos por primera vez. Diseminaron las semillas de los alimentos vegetales que les gustaban y dominaron las poblaciones de los animales que cazaban y que más tarde domesticarían. Estas prácticas de construcción de nichos eran mucho menos productivas que las tecnologías agrícolas que vinieron después, pero aun así permitieron que las poblaciones humanas crecieran mucho más que en ecosistemas no alterados. El sostenimiento de estas sociedades cada vez más numerosas y complejas requirió alteraciones ambientales progresivamente más intensas, junto con migraciones hacia regiones menos pobladas. La escena estaba lista para llevar la construcción humana de nichos a un nivel completamente nuevo: el surgimiento y la expansión de la agricultura.

Las sociedades dependientes de la agricultura surgieron en más de una docena de núcleos de domesticación en todos los continentes poblados salvo Australia (figura 26). Algunas se desarrollaron durante la transición del Pleistoceno al Holoceno, como las del sudoeste de Asia, América del Sur y el norte de China, otras entre 6000 y 8000 años atrás, como las del Yangtsé en China y las de América Central, mientras que otras se desarrollaron entre 4000 y 5000 años atrás en África, India, el sudeste asiático y las praderas norteamericanas. En algunos casos, grupos de cazadores-recolectores sedentarios se transformaron en pueblos agrícolas, como los del sudoeste de Asia o los del Yangtsé en China; en otras ocasiones, pueblos de cazadores nómadas se dedicaron al pastoreo, como en África, o cazadores-recolectores nómadas practicaron formas móviles de agricultura, como la agricultura

itinerante, tal como sucedió en India, Nueva Guinea y América del Sur (figura 27).



26. Núcleos de domesticación. Emplazamientos donde se produjo la domesticación de al menos un animal o una planta. Las grandes regiones indicadas mediante letras son: A. Sudoeste asiático; B. Sur de Asia; C. Este asiático; D. Nueva Guinea; E. África y sur de Arabia; F. América del Norte; G. Mesoamérica; H. América del Sur.



27. Cronología del desarrollo agrícola primigenio donde se ilustra la diversidad de rutas seguidas hasta llegar a la agricultura en diferentes regiones y distintos momentos temporales.

Los pueblos agrícolas crecieron con más rapidez que los grupos de cazadores-recolectores y acabaron desplazándolos de los territorios más productivos del planeta, tanto de forma directa como de maneras indirectas, cuando los grupos de cazadores-recolectores adoptaron de por sí las prácticas agrícolas. Los cambios sociales y ambientales que trajo consigo la agricultura no fueron nada lineales a lo largo del tiempo. Numerosas sociedades se desplomaron y volvieron a empezar desde cero. Sin embargo, existe una clara tendencia a largo plazo hacia la creación de sociedades agrarias cada vez más grandes apoyadas en el empleo cada vez más productivo del terreno, lo que se conoce como intensificación del uso de la tierra, con el paso del tiempo. Las primeras prácticas de cultivo itinerante utilizaban la tierra durante uno o dos años y luego volvían a desbrozar otro espacio cuando disminuía la fertilidad del suelo. Las poblaciones agrarias, la demanda de recursos y las habilidades sociales y culturales crecieron y se desarrollaron, y se adoptaron técnicas más intensivas en mano de obra y energía para aumentar la productividad de la

tierra, incluida la plantación anual de cultivos, el riego, el abono, el arado y otros métodos. La intensificación de la agricultura mediante el empleo de abonos comenzó en el sudoeste asiático y en Europa hace ya 8000 años, según indica la proporción de isótopos estables de nitrógeno en los granos conservados, y la producción de arroz irrigado es manifiesta ya unos 7000 años atrás en China e India, y se instauró ampliamente en las principales regiones productoras de arroz unos 5000 años atrás.

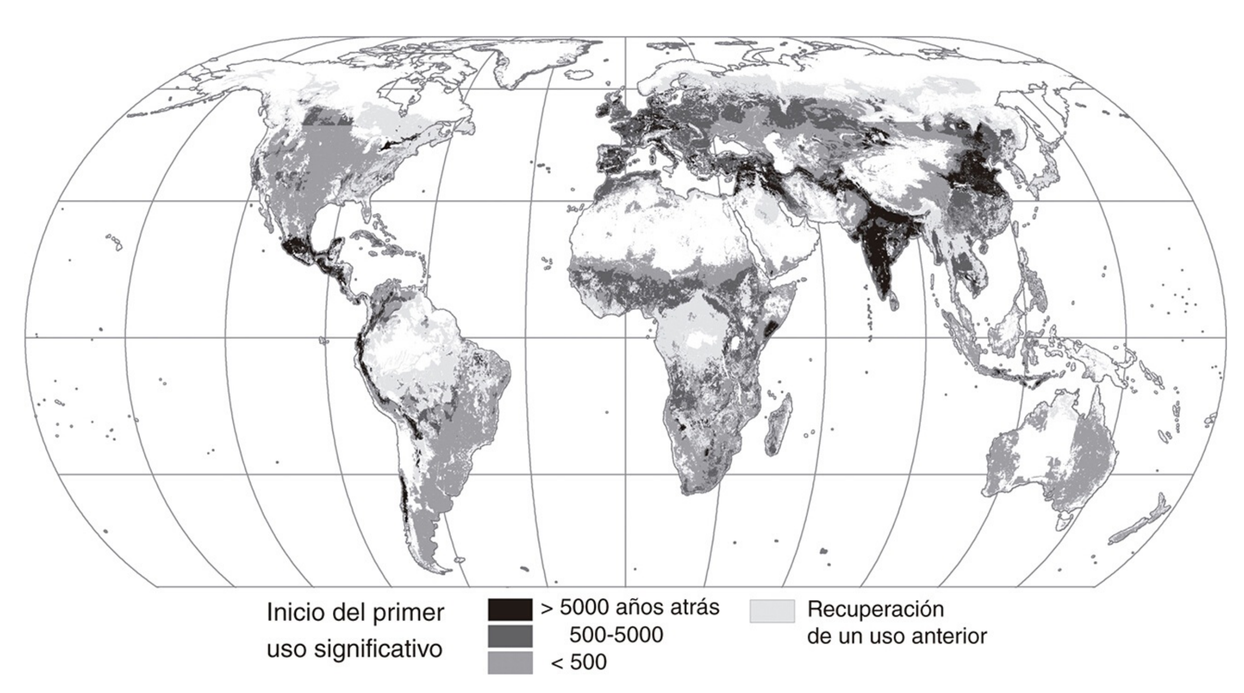
Que el uso agrícola del suelo estaba muy extendido a mediados del Holoceno lo confirman indicios abundantes, entre los cuales encontramos: depósitos de distintos suelos y sedimentos debidos al aumento de la erosión del terreno; el carbón vegetal; los restos de plantas y de semillas de cultivos como polen, granos de almidón y fitolitos (cristales de sílice producidos en las células de las plantas); huesos y otros restos de ganado doméstico; cambios en la composición isotópica de los suelos y los abonos fósiles, y cambios a largo plazo en la estructura de la vegetación y la composición de las especies que quedaron tras los primeros desbroces y la labranza del suelo. Los bosques actuales, desde el Mediterráneo hasta los trópicos, se reconocen cada vez más como legados bioculturales de una larga historia de usos humanos pretéritos. El empleo agrícola de la tierra también produjo suelos antropogénicos, desde los suelos plaggen enriquecidos con estiércol del noroeste de Europa, que pueden datar del año 4000 a. C., hasta los suelos de *terra preta* o «tierra oscura» enriquecidos con carbón vegetal y materiales de desecho que se observan en toda la cuenca del Amazonas y datan, quizás, del año 500 a. C. y que también pudieron producirse en África, junto con diversos «antrosoles» alterados por los abonos, el laboreo, el riego y otras prácticas de uso de la tierra en diferentes regiones. La presencia generalizada de suelos antropogénicos se ha propuesto como clavo dorado del Antropoceno que se remonta a 2000 años atrás, aunque las perspectivas de éxito de una propuesta de GSSP basado en suelos antropogénicos no son buenas debido a sus orígenes diacrónicos.

La transformación agrícola de la Tierra comenzó hace más de 10 000 años y sigue convirtiendo los hábitats naturales en paisajes agrícolas pensados y organizados para sustentar poblaciones de especies domesticadas (figura 28). Como la agricultura se extendió de manera gradual por los continentes a lo largo de milenios, empezó a dejar un legado de alteración de la química del suelo y de los procesos sedimentarios, derivada de la transformación que causaron el desbroce, el laboreo y la erosión. La hidrología cambió con los

embalses y los sistemas de riego. Y el funcionamiento de la biosfera, la atmósfera y el sistema Tierra en su conjunto empezaron a transformarse.

La hipótesis antropogénica temprana

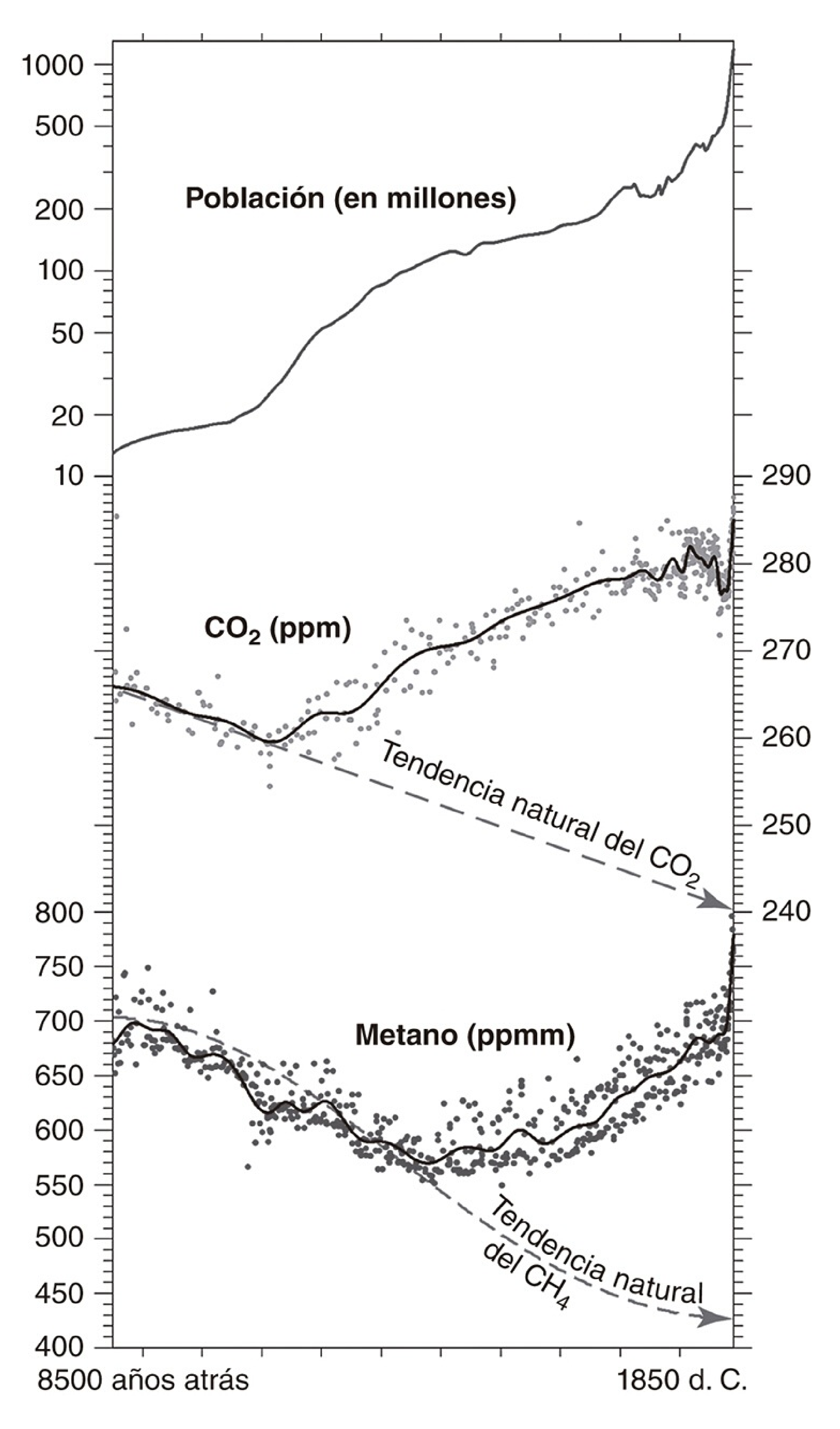
En 2003, el climatólogo William Ruddiman publicó un artículo científico titulado «The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago» [«La era del efecto invernadero antropogénico comenzó hace miles de años»]. Ruddiman afirmaba que con la tala de bosques para practicar la agricultura y con el riego de los arrozales, los agricultores antiguos generaron suficientes emisiones de dióxido de carbono y metano para alterar significativamente las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra (figura 29). Con ello provocaron un efecto de calentamiento idóneo para retrasar el siguiente ciclo glacial del Cuaternario. La «hipótesis antropogénica temprana» de Ruddiman se ha estudiado desde entonces en docenas de trabajos de investigación. Algunas de sus afirmaciones siguen siendo controvertidas, pero la premisa básica de que las sociedades humanas adquirieron la capacidad de transformar el funcionamiento de la Tierra como sistema mucho antes de la era industrial se sigue considerando muy en serio en la comunidad científica dedicada al estudio del sistema Tierra y está respaldada por múltiples líneas de investigación.



28. Mapamundi de la historia del uso del suelo donde se indica la fecha de los primeros usos intensivos agrícolas del territorio.

La hipótesis de Ruddiman compara la tendencia «natural» a la baja de los niveles de dióxido de carbono y metano atmosféricos observada en otros intervalos interglaciales con la observada en el Holoceno. A diferencia de lo ocurrido en periodos interglaciales anteriores, las concentraciones de metano dejaron de disminuir a mediados del Holoceno, hace 5000 años, y empezaron a aumentar. También se detecta una tendencia similar en el dióxido de carbono que comenzó 7000 años atrás. La hipótesis de Ruddiman atribuye estas tendencias anómalas a las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del uso agrícola del suelo.

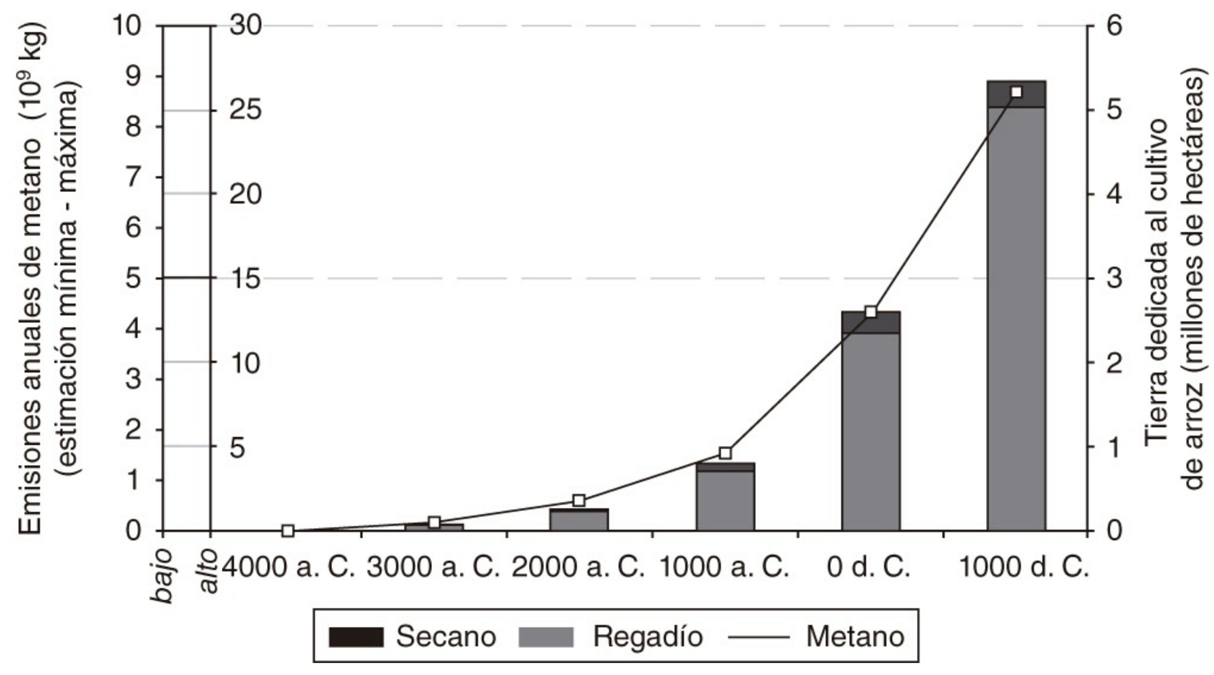
En 2011, el arqueólogo Dorian Fuller utilizó un modelo histórico de las regiones arroceras para evidenciar que las emisiones de metano procedentes de la producción temprana de arroz podrían responder de alrededor del 80 % de la tendencia antropogénica temprana del metano atmosférico (figura 30). Trabajos posteriores con isótopos de carbono han confirmado que aquellas primeras emisiones de metano fueron, en efecto, de origen antropogénico.



Población (en millones)
1000
500
200
100
50
20
10
CO2 (ppm)
290
280
270
260
250
240
Tendencia natural del CO2
Metano (ppmm)
800
750
700
650
600
550
500
450
400
Tendencia natural del CH4
8500 años atrás
1850 d. C.

29. La hipótesis de Ruddiman sostiene que los cambios preindustriales en el CO_2 y el metano atmosféricos se desviaron a mediados del Holoceno de las tendencias «naturales» observadas en periodos interglaciales previos, y que estas desviaciones se debieron al desmonte de tierras para la práctica agrícola (CO_2) y al cultivo de arroz y la cría de ungulados domésticos (sobre todo ganado y búfalos) en el caso del metano.

El cálculo de la tendencia anómala del dióxido de carbono ha resultado más espinoso debido, en parte, a que los flujos biogeoquímicos globales que regulan el dióxido de carbono en la atmósfera son más complejos y difíciles de medir que los del metano. Por ejemplo, hay que tener en cuenta al mismo tiempo los índices de emisión de carbono cuando se desbroza la tierra, cuando se quema la vegetación y se labra el suelo, así como la absorción de carbono cuando la vegetación vuelve a crecer tras el abandono de la tierra. También es necesario compensar las emisiones con la absorción de carbono por parte del océano, las turberas y otros elementos del ciclo global del carbono.



30. Emisiones de metano procedentes de tierras dedicadas a la producción de arroz de secano y de regadío entre 6000 y 1000 años antes del momento actual (del año 4000 a. C. al año 1000 d. C.).

Las voces críticas se preguntan cómo es posible que las pequeñas poblaciones agrícolas de mediados del Holoceno, en especial las escasas decenas de millones de personas que vivían hace 7000 años, desbrozaran y cultivaran una superficie de tierra tan extensa, y por qué sus emisiones no parecen acelerarse con el crecimiento de la población en épocas posteriores del Holoceno. Si las emisiones se calculan sobre la base de una cantidad constante de tierra empleada por persona, se obtiene que el desmonte y las

emisiones de carbono de los primeros tiempos serían demasiado exiguos para respaldar la hipótesis de Ruddiman. Pero cuando se incluyen las tendencias históricas de intensificación del uso de la tierra, teniendo en cuenta que los primeros agricultores utilizaban mucha más tierra por persona que los actuales (aunque de forma mucho menos intensiva), se ve que los desmontes y las emisiones siguen tendencias similares a las observadas en el Holoceno medio y tardío.

Simulaciones climáticas recientes han confirmado que las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de las primeras sociedades agrícolas tuvieron la capacidad de alterar la evolución climática de la Tierra, aunque la magnitud de este cambio y su localización temporal se siguen investigando de forma activa. Las grandes emisiones agrícolas de dióxido de carbono de unos 7000 años atrás siguen siendo una hipótesis creíble aunque controvertida. Sin embargo, las emisiones tempranas de metano derivadas de la producción de arroz se aceptan ahora de manera generalizada como causa de un aumento sustancial de las concentraciones atmosféricas de metano unos 5000 años atrás. La alteración antropogénica temprana del metano atmosférico, registrada en una sucesión de testigos de hielo similar a la que define el Holoceno, se ha propuesto como clavo dorado para marcar el límite inferior del Antropoceno, aunque las dificultades de correlación a nivel mundial más allá del testigo de hielo plantean dificultades para su adopción como límite cronoestratigráfico formal dentro de la escala de tiempo geológico.

Crecimiento y expansión de la población

Hace 6000 años, las poblaciones agrícolas continuaron creciendo, incrementaron su densidad y se expandieron por todos los continentes excepto Australia, a pesar del colapso ocasional de algunas sociedades. Con ello se evolucionó en el empleo de sistemas de explotación de la tierra cada vez más intensivos y productivos para sustentar poblaciones progresivamente más densas. El mayor rendimiento de estos sistemas creó excedentes agrícolas que encontraron salida a través del comercio y los tributos, lo que permitió el surgimiento de poblaciones urbanas con organizaciones sociales cada vez más jerarquizadas y complejas, con actividades especializadas que abarcaron desde la artesanía hasta el comercio y la realeza, así como herramientas novedosas para vivir en un mundo social que incluyeron el uso del dinero, la escritura y la metalurgia (un elemento crucial para nuevas formas de armamento). Las economías de escala en las grandes poblaciones urbanas

supusieron numerosos beneficios (como más acceso a la riqueza y a ciertos servicios) y atrajeron a la población rural, lo que impulsó aún más el crecimiento urbano, salvo cuando se producían brotes de enfermedades. Las primeras ciudades con 50 000 habitantes o más se convirtieron en centros de poder y de comercio de sociedades de una escala aún mayor que aparecieron hacia el año 3000 a. C. en el valle del Indo. Hacia el año 1 d. C., prosperaron en todo Oriente Próximo, Europa y Asia ciudades con cientos de miles de habitantes que se volvieron cada vez más dependientes de las grandes redes de comercio, algunas de ellas intercontinentales, como la ruta de la seda que conectaba Europa occidental con China oriental, y también un número creciente de rutas marítimas. Las sociedades humanas aumentaron su población y se expandieron por más zonas del planeta.

A través del comercio, la guerra, la religión y otras interacciones sociales, las sociedades humanas se interconectaron cada vez más en «sistemas mundiales» de intercambio. Los conocimientos culturales, los artilugios, los recursos naturales y los organismos vivos se propagaron con rapidez por estos sistemas mundiales, tanto de un modo intencionado en forma de bienes comerciales, como de un modo no intencionado, cual polizones, incluidas plagas y enfermedades. Se construyeron carreteras y vías fluviales para transportar mercancías a grandes distancias. Las sociedades emprendieron la exploración, la expansión y el comercio por tierras y sociedades nuevas con la ayuda de embarcaciones y técnicas de navegación cada vez más seguras que permitieron convertir los océanos abiertos en autopistas de intercambio entre sociedades.

Incluso con tecnologías más tradicionales, las sociedades polinesias lograron desplegarse en barco por las islas del Pacífico a partir de unos 3500 años atrás, llevando consigo un conjunto de especies domesticadas, desde plátanos y ñames hasta perros, cerdos y pollos, y también, sin quererlo, ratas. La colonización de nuevas tierras por parte de una sociedad agrícola compleja conllevó la transformación profunda de los paisajes y ecosistemas mediante el uso del fuego, el desbroce de tierras, el cultivo de especies domesticadas y la introducción de ratas y otros animales y plantas foráneas que se alimentaron de un gran número de especies autóctonas o las desplazaron por competencia. Esto provocó la extinción de megafauna, de animales más pequeños y hasta de numerosas especies de plantas. Los signos materiales clásicos de la colonización agrícola, en forma de artefactos culturales, carbón vegetal, suelos erosionados, especies nuevas y extinciones generalizadas de especies, son evidentes por todo el Pacífico, desde Hawái hasta Nueva Zelanda.

Un sistema mundial global

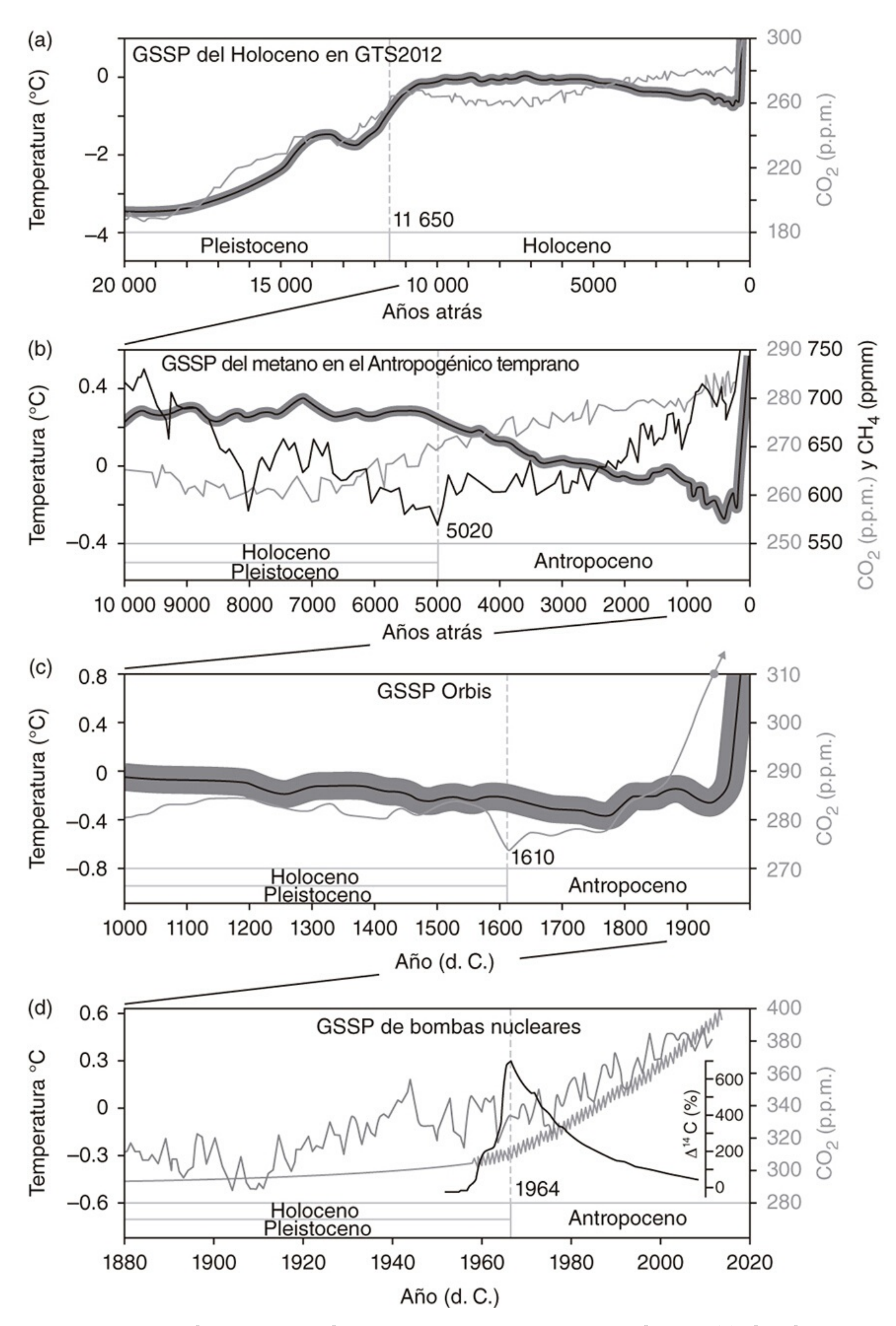
Aunque las sociedades del «Viejo Mundo» de Eurasia ya estaban interconectadas a través del intercambio hace más de 2000 años, las sociedades humanas aún no se relacionaban de manera global, a pesar de su presencia en todos los continentes excepto la Antártida. La creciente demanda europea de riqueza, poder e influencia cambiaría esta situación impulsando una expansión del comercio más allá de las rutas habituales. Al final, hace más de 500 años, estos empeños darían lugar al primer intercambio bidireccional importante de cultura y biología entre Europa y América. El «descubrimiento» accidental de América por parte de Cristóbal Colón desencadenó un proceso de cambio social y medioambiental a escala planetaria como ningún otro antes: el intercambio colombino a través del cual el Viejo y el Nuevo Mundo se convirtieron en uno solo. Los esfuerzos europeos para extraer riqueza de América favorecieron que las sociedades humanas se integraran por primera vez en un sistema mundial verdaderamente global de intercambio social, material y biológico.

Los europeos codiciaban el oro, las especias y otros recursos naturales raros, pero sus rutas comerciales también portaron multitud de fuerzas sociales y biológicas profundamente transformadoras: nuevas prácticas culturales, tecnologías, especies domesticadas y enfermedades. Las patatas, los tomates, los pimientos y el maíz americanos transformaron los sistemas agrícolas de todo el mundo, no solo en Europa, sino también en Asia y África. En toda América cambiaron las estrategias de subsistencia con la introducción del ganado doméstico, desde los caballos (los equinos nativos se habían perdido en América con la extinción del Pleistoceno) hasta el ganado vacuno y los cerdos. Muchas otras especies también viajaron con ellos y mezclaron poblaciones de flora y fauna que llevaban millones de años evolucionando por separado en los distintos continentes, lo que dio lugar a un proceso veloz de «homogeneización biótica». Todos estos cambios dejaron su huella en el registro estratigráfico, pero hay un intercambio biológico en particular que destaca por sus rápidos efectos transformadores.

Se calcula que la introducción de la viruela y de otras enfermedades procedentes del Viejo Mundo mató a unos 50 millones de nativos americanos entre 1492 y 1650, durante epidemias de enfermedades europeas a las que nunca habían estado expuestos. Los resultados fueron catastróficos y supusieron el derrumbe de sociedades enteras ante el rápido descenso de la

población en un 50 %, un 90 % o más. Las epidemias se propagaron con tanta rapidez a través de las redes indígenas de intercambio que muchas sociedades nativas habían sucumbido ya antes de que los europeos llegaran hasta ellas. Los trabajos forzados, los reasentamientos, la violencia colonial y la importación de esclavos no hicieron más que acelerar la masacre. Antes de que los europeos empezaran a transformar los paisajes americanos en plantaciones y ranchos comerciales a gran escala, las sociedades indígenas que durante mucho tiempo habían cultivado la tierra y utilizado el fuego para controlar la vegetación se habían reducido a una mínima parte de su extensión previa. En su ausencia, los bosques volvieron a crecer y absorbieron tanto carbono en el proceso que pudieron reducir considerablemente el dióxido de carbono atmosférico, un efecto que tal vez sea evidente en las mediciones tomadas en testigos de hielo de alrededor de 1610.

En 2015, un ecologista y un geógrafo llamados Simon Lewis y Mark Maslin publicaron en *Nature* una revisión de las propuestas del GSSP del Antropoceno e introdujeron una propia: el «clavo Orbis» (figura 31). La hipótesis *Orbis*, que en latín significa «mundo», propuso que el Antropoceno comenzó con el intercambio colombino con el que el «choque entre el Viejo y el Nuevo Mundo» señaló al ser humano no ya como una especie planetaria, sino también como un sistema y una fuerza globales con unas consecuencias geológicas sin precedentes, que incluían el intercambio y la homogeneización mundiales de la biota de la Tierra. Además, la magnitud sin precedentes del cambio social, la extracción de recursos y el uso comercial de la tierra que desencadenaron los europeos en América impulsaron a la larga el desarrollo de las sociedades industriales. La emergencia del primer sistema humano global de la Tierra ocurrió a lo largo de varios cientos de años, lo que dejó un registro permanente, aunque en su mayoría diacrónico, en la homogeneización global de la flora y la fauna, junto con los signos materiales habituales de un cambio socioambiental transformador. Sin embargo, hubo al menos un cambio global veloz que podría servir para definir un GSSP Orbis para el Antropoceno: una pequeña caída en las concentraciones de dióxido de carbono alrededor de 1610 registrada en un testigo de hielo.

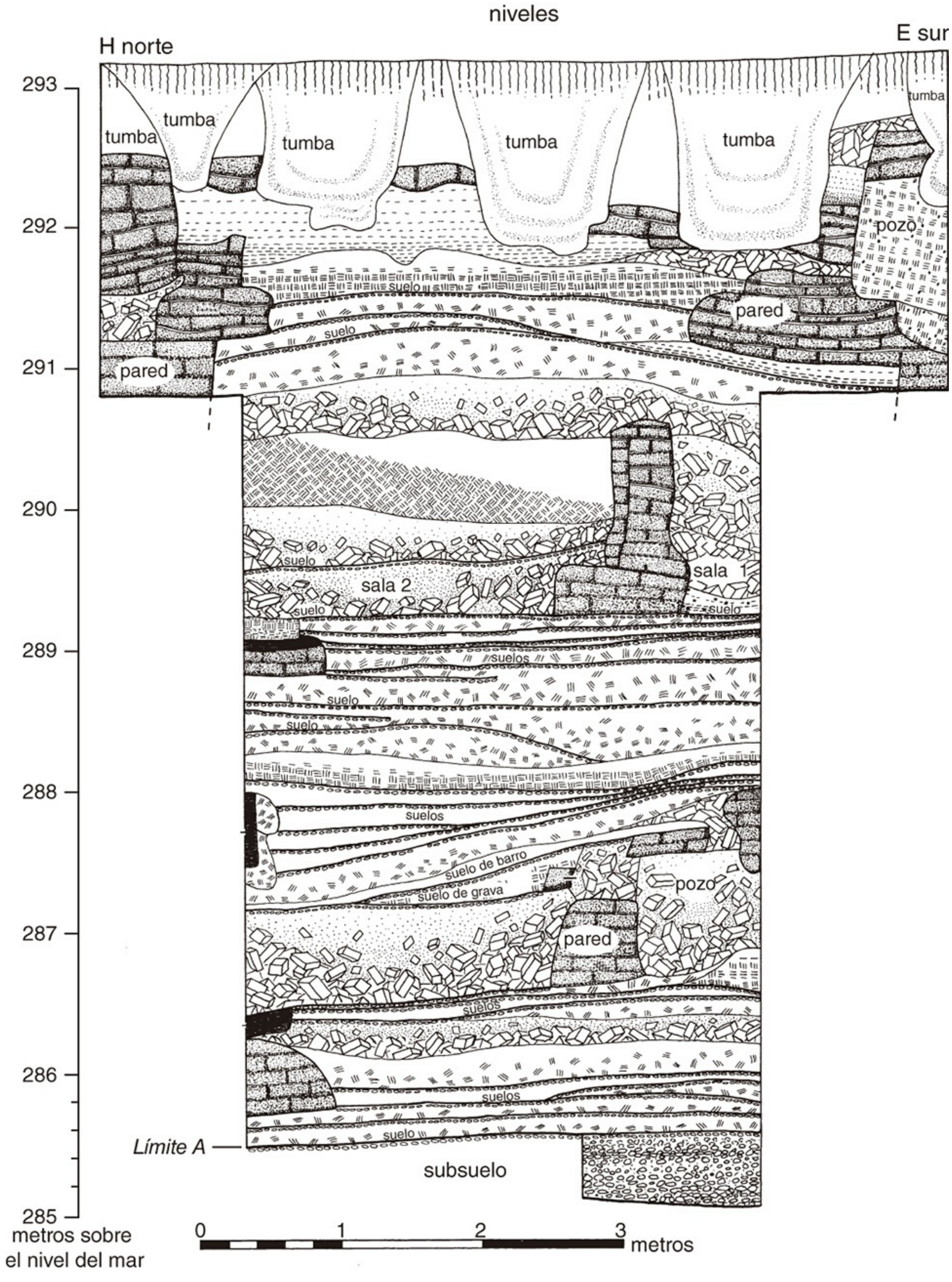


31. Propuestas de GSSP para el Antropoceno temprano comparadas con (a) el Holoceno, basado en los cambios en el CO_2 relacionados con la transición entre una glaciación y un periodo interglacial 11 650 años atrás, (b) el aumento antropogénico del metano hace 5020 años (hipótesis de Ruddiman), (c) el «clavo» Orbis de CO_2 alrededor de 1610, y (d) los niveles máximos de radiocarbono (^{14}C) en los anillos de los árboles alrededor de 1964 derivados de las pruebas atmosféricas con bombas nucleares.

El tiempo humano

Tal como señalaron el arqueólogo Matthew Edgeworth y otros en un artículo titulado «Diachronous Beginnings of the Anthropocene» [«Comienzos diacrónicos del Antropoceno»], «la arqueología y la geología son disciplinas relacionadas» y se basan en gran medida en los mismos principios estratigráficos. Geólogos y arqueólogos a menudo trabajan juntos en los mismos lugares, aunque los geólogos se centran en los procesos naturales que han dado forma a un lugar a lo largo del tiempo y los arqueólogos se centran en determinar los límites inferiores en los que el ser humano ha depositado sus propias capas de material antropogénico, lo que Edgeworth ha denominado la «arqueosfera». En otras palabras, la arqueosfera podría considerarse una línea divisoria entre el saber estratigráfico de los geólogos y el de los arqueólogos.

La naturaleza del registro material que estudian los especialistas en estratigrafía arqueológica es especialmente compleja, heterogénea y diacrónica (figura 32). Es habitual que los depósitos dejados por una sociedad o incluso por una sola casa sean remodelados por otra mediante la excavación de zanjas, cimientos y tumbas, a los que se añadirán aún más edificaciones, desechos y escombros, y todo ello puede quedar cubierto más tarde por capas de sedimentos depositados por inundaciones y otros procesos naturales, o haber sido retirado para emprender una nueva construcción. Puede exhibir correlaciones en cuanto a profundidad y composición con los yacimientos dejados por una sociedad determinada, o puede no hacerlo. Puede estar perforado en un lugar por catacumbas, pozos profundos y túneles de metro y, en cambio, en otro estar cubierto por terrenos labrados, humedales artificiales, un vertedero o una colina compuesta por múltiples capas de asentamientos instalados unos sobre otros a lo largo de milenios (un *tell*, un rasgo arqueológico habitual de Oriente Próximo). La profundidad de las capas varía desde su inexistencia en algunos lugares hasta decenas de metros en otros. A todas las escalas, desde un solo yacimiento hasta el conjunto de una región y sobre todo a nivel mundial, la arqueosfera es muy heterogénea y diacrónica. En opinión de Edgeworth, y de los arqueólogos en general, la diacronía define no solo la arqueosfera, sino también el mismísimo Antropoceno.



32. Perfil estratigráfico de depósitos antropogénicos en un asentamiento de Siria ocupado desde unos 11 000 hasta 7000 años atrás.

En arqueología también se utilizan métodos estratigráficos para elaborar calendarios del tiempo humano (figura 33). Pero, a diferencia de lo que

sucede con el tiempo geológico, hasta los calendarios arqueológicos más generalizados son deliberadamente diacrónicos. Su objetivo consiste en caracterizar las distintas rutas de desarrollo seguidas por diferentes sociedades, en diferentes lugares y en diferentes momentos. Existe un sistema general de «edades» arqueológicas que comienza con las primeras herramientas de piedra que se usaron en el Paleolítico, o la «edad de la piedra antigua», y que termina con el Pleistoceno. El Holoceno comienza con las sociedades epipaleolíticas, que continuaron en gran medida con los modos de vida paleolíticos, y con las sociedades neolíticas, que adoptaron la agricultura. Las sociedades de la Edad del Bronce y del Hierro se reconocen por su capacidad para fabricar estos metales y por los cambios concomitantes en la escala y la complejidad de estas sociedades. Sin embargo, a pesar de algunos paralelismos notables en su desarrollo, las sociedades neolíticas surgieron en todo el mundo en diferentes lugares y momentos, como las de América, Oriente Próximo y Asia Oriental. Los arqueólogos también dependen de sistemas temporales locales y regionales mucho más detallados para interpretar los periodos de desarrollo de las diferentes sociedades.

Holoceno	**Edad del Hierro** *ca.* 3 ka hasta el presente
	Edad del Bronce *ca.* 5 a 3 ka
	Epipaleolítico | Neolítico *Transitorio | Agrícola* *ca.* 10 a 5 ka
Pleistoceno	**Paleolítico superior** Conductas «modernas» *ca.* 50 a 10 ka
	Paleolítico medio *Humanos de anatomía moderna* *ca.* 300 a 50 ka
	Paleolítico inferior *Pre Homo sapiens* *ca.* 3.3 ma a 300 ka

33. El sistema de tres edades de la arqueología. Las edades «líticas» representan la Edad de la Piedra, que se diferencia de las Edades del Bronce y del Hierro. Estos patrones generales de cambio cultural no siempre se dan y también se complementan con divisiones temporales más detalladas relevantes en lugares y regiones específicos.

La arqueología no aspira a crear una línea temporal sincronizada a escala mundial del cambio social humano ni de su incidencia en los entornos, porque esta no es la manera en la que se formaron las sociedades humanas ni en la que cambian.

Más grueso, más profundo

El Antropoceno cuenta la historia de la capacidad humana para transformar el planeta. Pero ¿cuándo comienza esta historia? El Grupo de Trabajo del Antropoceno ha tomado la época de mediados del siglo XX como el instante temporal más adecuado para un GSSP que marque el inicio del Antropoceno en la escala de tiempo geológico, aunque señala que la incidencia antropogénica comenzó mucho antes. Pero para arqueólogos, antropólogos, geógrafos, geólogos y otros especialistas centrados en las causas a largo plazo del cambio ambiental antropogénico global, más que en sus consecuencias, el Antropoceno comienza mucho antes de 1950.

Un Antropoceno anterior permitiría admitir las extinciones de megafauna del Pleistoceno tardío, la aparición y difusión de la agricultura, el aumento del metano atmosférico debido a la producción de arroz hace 5000 años, los suelos antropogénicos generalizados hace 2000 años, la formación de un sistema mundial global unos 500 años atrás (el clavo Orbis) o el inicio de la era industrial hace unos 200 años. Algunas de estas propuestas alternativas para GSSP anteriores incluyen indicadores estratigráficos, como las señales halladas en testigos de hielo a las que ya se ha aludido, aunque el Grupo de Trabajo del Antropoceno los ha considerado insuficientes para satisfacer los criterios estratigráficos empleados para confeccionar la escala de tiempo geológico.

Smith y Zeder sostienen que no es necesario un nuevo GSSP. Podríamos limitarnos a renombrar el Holoceno para que pase a denominarse Holoceno/Antropoceno. Otra posibilidad consiste en admitir los orígenes de la transformación humana de la Tierra mediante un intervalo de tiempo no geológico, un «Paleoantropoceno». Otros, como Ruddiman, han propuesto que, dada la naturaleza continua de la alteración ambiental antropogénica, el Antropoceno no debería formalizarse en absoluto, sino que debería emplearse de manera informal, como un «antropoceno» en minúsculas. Lo único que enlaza todas estas propuestas es el enfoque común de reconocer la larga, rica y diacrónica historia de la alteración humana de los entornos terrestres. La Revolución Industrial y la gran aceleración no son más que los capítulos finales y más impactantes de una larga, enmarañada y evolutiva historia de transformación del medio ambiente de la Tierra por parte del ser humano; una historia que aún continúa.

Los estratígrafos del mundo humano han establecido que los procesos por los que cambian y evolucionan las sociedades humanas y sus entornos son

acumulativos, continuos, heterogéneos, diacrónicos y complejos. Los signos materiales de las transformaciones ambientales antropogénicas son igualmente complejos y diacrónicos, se hunden en las profundidades del pasado humano y se extienden ampliamente por todo el planeta. Desde un punto de vista arqueológico, no hay nada reciente o inusual en la alteración humana de los entornos de la Tierra. El mundo humano siempre ha sido antropogénico. Casi todas las sociedades humanas de la historia de este planeta han vivido en entornos modificados por sus antepasados.

Aunque las primeras transformaciones humanas de la Tierra ocurrieron sin lugar a dudas a una escala mucho menor y menos veloz que la actual, han dejado signos tan permanentes como los depositados en etapas posteriores, solo que se encuentran enterrados a una profundidad mayor y más dispersos por la noche de los tiempos. Pero es precisamente esta acumulación gradual de capas y rasgos antropogénicos desde la prehistoria hasta la actualidad lo que los arqueólogos consideran digno de estudio, y no la identificación de una frontera precisa en el tiempo y las rocas que marque una transformación significativa de la Tierra a escala global por parte del ser humano.

6. Oíkos

La remodelación humana de la ecología ha estado impulsando la transición al Antropoceno desde sus inicios. La extinción masiva y las invasiones de especies, las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio climático, la alteración de los suelos y la hidrología, la transformación masiva de hábitats naturales en paisajes antropogénicos… todo ello se debió al cambio ecológico antropogénico. Las ciencias ecológicas y medioambientales han sido determinantes para describir estos cambios, pero también se han esforzado por entenderlos como algo más que una mera alteración temporal de un mundo, por lo demás, natural y salvaje. Por ejemplo, el Antropoceno plantea retos aún mayores a quienes trabajan para conservar y restaurar los hábitats naturales. ¿Qué significa «hábitat natural» en un planeta transformado por los seres humanos? En un controvertido ensayo de 2011 titulado «Conservation in Anthropocene» [«La conservación en el Antropoceno»], Peter Kareiva, por entonces jefe científico de una de las organizaciones de conservación más grandes del mundo, The Nature Conservancy, lo resumió así:

> la escala global de esta transformación ha reforzado la intensa nostalgia de conservación de los espacios naturales y un pasado de naturaleza prístina. Pero seguir centrando la conservación en preservar islas de ecosistemas del Holoceno en la era del Antropoceno es tan anacrónico como contraproducente.

La división de la naturaleza

La ecología, del griego *oikos* («casa»), es una disciplina científica relativamente nueva e integradora que se centra en dilucidar las interacciones entre los organismos y sus entornos, incluidas las cadenas tróficas que conectan a carnívoros, herbívoros y plantas; la distribución espacial de poblaciones de plantas y animales, y los flujos biogeoquímicos entre los organismos y su entorno abiótico. La ecología, surgida a finales del siglo XIX, hunde sus raíces en las profundidades de la historia natural, que se remontan hasta Aristóteles y más atrás. Charles Darwin fue un naturalista, al igual que Carolus Linnaeus (1707-1778), quien clasificó la vida en especies, y

Alexander von Humboldt (1769-1859), que cartografió los patrones ambientales globales de la vida.

Darwin y la mayoría de naturalistas se sentían cómodos incluyendo al ser humano en su trabajo, al menos a los humanos prehistóricos y a sus contemporáneos no europeos. Pero esto ya había empezado a cambiar a finales del siglo XVIII, cuando el conde de Buffon estableció la distinción entre «naturaleza original» y «naturaleza civilizada» por la humanidad. Esta separación entre naturaleza humana y no humana aumentó con el auge de las ciencias naturales, entre ellas la ecología, que dejaron el estudio del mundo humano a las ciencias sociales y las humanidades. Los ecólogos, al igual que arqueólogos y antropólogos, desarrollaron la tradición de estudiar emplazamientos y regiones cada vez más reducidos, donde las interacciones regionales y globales entre los seres humanos y el mundo natural pudieran considerarse externas a sus estudios.

Dividir la naturaleza en dos partes siempre ha sido problemático, sobre todo si se tiene en cuenta quién establece esa división. Sin embargo, este acto artificial de separación también pudo incrementar la sensibilidad de los ecólogos hacia las capacidades transformadoras de las sociedades humanas. En 1778, el conde de Buffon ya estaba preparado para afirmar que «toda la faz de la Tierra porta la huella del poder humano». En 1997, el ecólogo Peter Vitousek y su equipo publicaron un artículo muy influyente en *Science* en el que aportaron pruebas de que «vivimos en un planeta dominado por el ser humano». Y la primera persona que puso nombre al Antropoceno no fue Paul Crutzen, sino el ecólogo lacustre Eugene Stoermer.

El mito de lo prístino

Para estudiar los hábitats y ecosistemas inalterados por los humanos, muchos ecólogos, sobre todo de América del Norte, han buscado lugares sin signos evidentes de actividad humana. Sin embargo, incluso antes de que el cambio climático antropogénico se convirtiera en algo demasiado ubicuo como para ignorarlo, esta estrategia ya despertaba recelos en el ámbito científico.

Los paleoecólogos, los estratígrafos de la ecología, reconstruyen los cambios ecológicos acaecidos en el pasado a partir de los restos materiales de los ecosistemas pretéritos. Combinado con la labor realizada por arqueólogos, paleontólogos (especialistas en fósiles), historiadores ambientales y otros, su trabajo ha evidenciado que la transformación humana de los ecosistemas ha

dejado legados ecológicos que han perdurado desde el Pleistoceno tardío hasta nuestros días (figura 34). La extinción de grandes herbívoros, como el mamut lanudo, convirtió las praderas en bosques. El control de la vegetación con el uso del fuego modificó los suelos y alteró los niveles de nutrientes. Incluso la agricultura más temprana redistribuyó nutrientes por los territorios incrementando la fertilidad del suelo en algunos lugares y reduciéndola en otros, lo que alteró de forma permanente la química del suelo y otras de sus propiedades. Estos legados antropogénicos en los suelos pueden seguir condicionando la composición de especies y la productividad de las comunidades vegetales siglos e incluso milenios después. Las especies se han redistribuido por los distintos paisajes y regiones a través del comercio, las migraciones y los esfuerzos intencionados de cazadores-recolectores, agricultores y comerciantes. En lagos, estanques, humedales y otras zonas someras de los paisajes se han acumulado registros estratigráficos de larga duración de estos efectos humanos, tanto directamente en forma de depósitos de carbón vegetal, polen y sedimentos con huellas químicas e isotópicas variables, como indirectamente en forma de diatomeas (algas microscópicas) y otras plantas acuáticas que respondieron a la variación de los nutrientes y otras influencias externas.



34. Transformación ecológica a largo plazo de los paisajes donde se ilustra (a) el impacto de la eliminación de los grandes herbívoros, (b) los efectos a largo plazo de la agricultura antigua sobre la geoquímica del suelo y la biodiversidad vegetal en los bosques, y (c) las respuestas a la alteración cultural de las cuencas lacustres.

Incluso en muchas regiones que parecen estar libres del influjo humano, los indicios paleoecológicos demuestran con regularidad que los patrones y

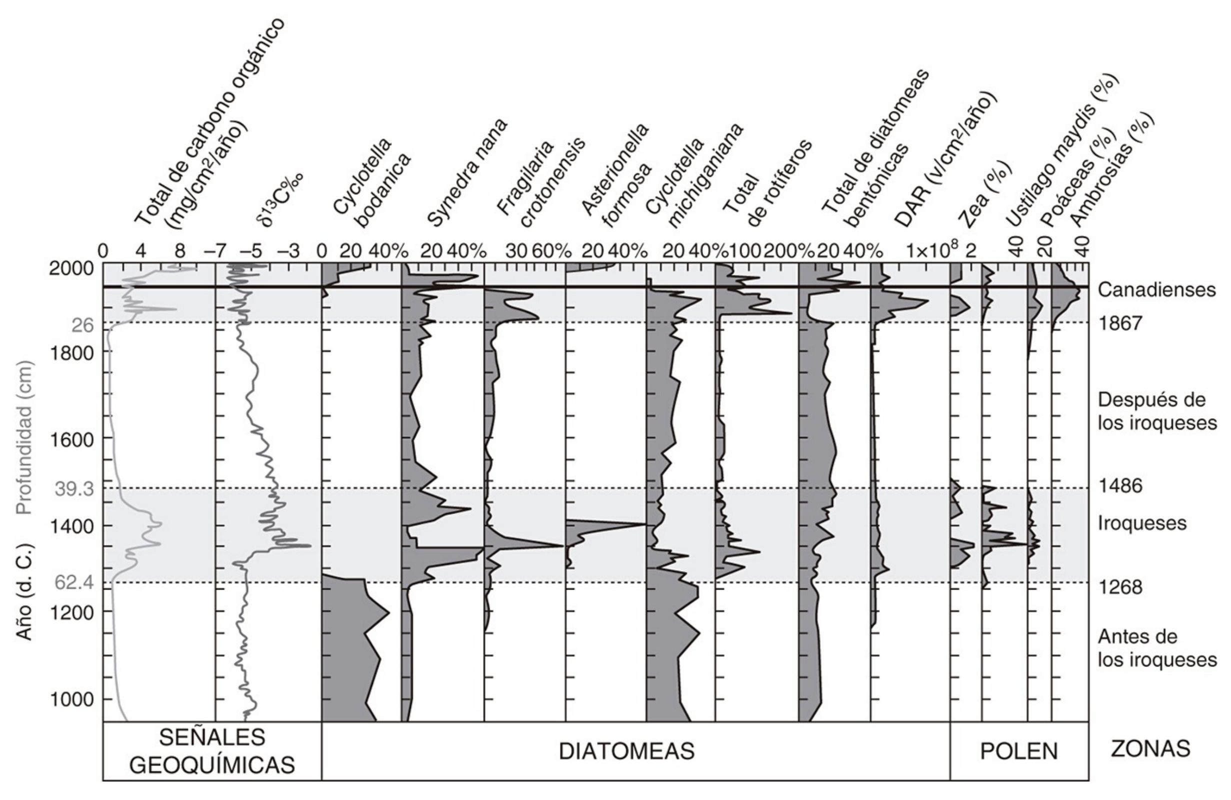
procesos ecológicos contemporáneos se vieron modificados por las primeras sociedades humanas. Basta con imaginar cómo sería la vegetación del norte de Europa o Canadá si aún existiera el mamut lanudo. Hasta en las remotas selvas tropicales de la Amazonia se ha puesto de manifiesto una distribución arbórea modificada por los esfuerzos del ser humano para propagar las especies más deseables, como la nuez de Brasil, la cual difundieron durante milenios los habitantes de la selva y todavía se cosecha en la mayoría de árboles silvestres. Cada vez hay más signos de que las inmensas selvas tropicales de la Amazonia y el Congo pudieron quedar alteradas en gran medida por el uso humano del fuego, los cultivos rotatorios, la dispersión y la propagación de las especies preferidas, y otras prácticas de cazadores-recolectores y los primeros pueblos agrícolas relacionadas con el uso del suelo. Sin embargo, muchos ecólogos y conservacionistas han tendido a percibir los hábitats sin personas como lugares no influidos por el ser humano.

En la mayor parte de Europa y Asia, y en algunas partes de África, los paisajes suelen estar demasiado poblados y alterados por el ser humano como para equivocarse tanto con ellos. Pero los descendientes de los colonos europeos de América y Australasia suelen confundir las densas superficies boscosas con hábitats «prístinos», intactos, cuando la realidad es que aún se están recuperando del largo control que ejercieron sobre ellos sociedades humanas anteriores. El geógrafo William Denevan señaló este error en el artículo de 1992 que tituló con acierto «The Pristine Myth: The Landscape of the Americas in 1492» [«El mito de lo prístino: el paisaje de las Américas en 1492»]. Tim Flannery hizo lo mismo con los paisajes australianos en su libro *The Future Eaters* [«Los comedores del futuro»]. Antes de que llegara a empezar el Holoceno, las actividades humanas transformaron vastas regiones de todos los continentes. El mito de lo prístino (según el cual, los lugares donde no hay humanos en la actualidad constituyen una ecología libre de efectos humanos previos) se considera ahora una barrera importante para entender los patrones y procesos ecológicos contemporáneos.

Alteración

Los testigos de sedimentos fechados que se han extraído de lagos aportan algunos de los registros más rotundos de los cambios ecológicos que se han producido a largo plazo. Uno de estos testigos procedente del lago Crawford, en Ontario (Canadá), y analizado con la ayuda de Eugene Stoermer (nada

menos), se ha usado como ejemplo principal de las complejidades del cambio ecológico antropogénico en los debates entre arqueólogos y geólogos críticos con la formalización del Antropoceno y el Grupo de Trabajo del Antropoceno [(figuras 35 y 34(c)]. El testigo contiene el registro de más de 1000 años de cambios ecológicos en los alrededores del lago, con aumentos en la producción de algas y de carbono orgánico derivados del aporte de nutrientes por parte de la agricultura y variaciones en las poblaciones de diversas especies de diatomeas.



35. Señales estratigráficas de la actividad humana en un testigo de sedimentos del lago Crawford. δ13C = razón entre C-13 y C-12.

El empleo de la tierra para la agricultura dejó depósitos de polen de maíz y de malezas silvestres muy comunes, así como esporas de huitlacoche (*Ustilago maydis*), un hongo que parasita el maíz. El testigo revela con claridad que el cultivo de maíz por parte de los iroqueses y sus asentamientos en torno al lago desde 1268 hasta 1486 erosionaron los suelos e incrementaron el aporte de nutrientes al lago. La agricultura cesó entonces hasta 1867, cuando los colonos europeos (canadienses) volvieron a ocupar la zona, a cultivar maíz y a contaminar el lago. Los signos estratigráficos del cambio de uso del suelo también se manifiestan a mediados del siglo XX.

Las complejidades de la alteración humana son más que evidentes en los registros paleoecológicos dinámicos del lago Crawford y de muchos otros. En

algunos depósitos lacustres, aunque desde luego no en todos, una capa de lluvia radiogénica de mediados del siglo XX puede coincidir con cambios bióticos o químicos específicos, lo que proporciona una base sólida para que el Grupo de Trabajo del Antropoceno establezca un marcador correlacionable a escala global para una época del Antropoceno. En cualquier caso, para el ecólogo Eugene Stoermer y otros científicos especializados en los registros paleoecológicos del cambio antropogénico, no faltan pruebas de que la alteración humana de las comunidades y los ecosistemas es compleja, dinámica, diacrónica y sostenida a través de largos periodos de tiempo.

Las dinámicas de la variación ecológica son complejas incluso sin la intervención del ser humano. Un ejemplo destacado lo ofrece el fuego. En las regiones más secas, los incendios se repiten con cierta periodicidad, lo que deja depósitos de carbón vegetal, nutrientes y mosaicos con parches de vegetación en diferentes fases de sucesión secundaria. En estas zonas, el fuego es una parte habitual del funcionamiento del ecosistema, lo que establece un «régimen de alteración» por incendios recurrentes al que se han adaptado muchas especies, por ejemplo, con cortezas ignífugas y semillas cuya germinación depende del fuego. Consideremos las piñas del pino de Banks (*Pinus banksiana*) de América del Norte, que solo se abren para liberar las semillas cuando se exponen al intenso calor de los incendios forestales.

Antes de que los ecólogos entendieran la relevancia de los regímenes de alteración, recomendaban eliminar los incendios para conservar la vegetación existente. Como consecuencia, las especies adaptadas al fuego no se reproducían y, con el tiempo, se acumulaba biomasa inflamable que causaba incendios imposibles de apagar y mucho más virulentos que antes; a veces hasta se quemaban los suelos con esos incendios. Los ecólogos aprendieron una dura lección: la alteración es crucial para los ecosistemas y las comunidades, y su eliminación puede trastocar comunidades y hábitats. Además, en lugares como Australia y el este de América del Norte, los regímenes del fuego que modelaron la ecología de los paisajes durante miles de años fueron antropogénicos, provocados por cazadores-recolectores y agricultores que manipulaban intencionadamente la vegetación usando el fuego.

La compleja dinámica de las interacciones entre el ser humano y el entorno convierte en un desafío detectar si se ha producido un cambio ecológico significativo. Para lograrlo es necesario caracterizar el «rango histórico de variabilidad» de los parámetros ecológicos, incluyendo variaciones en las poblaciones de las distintas especies, condiciones

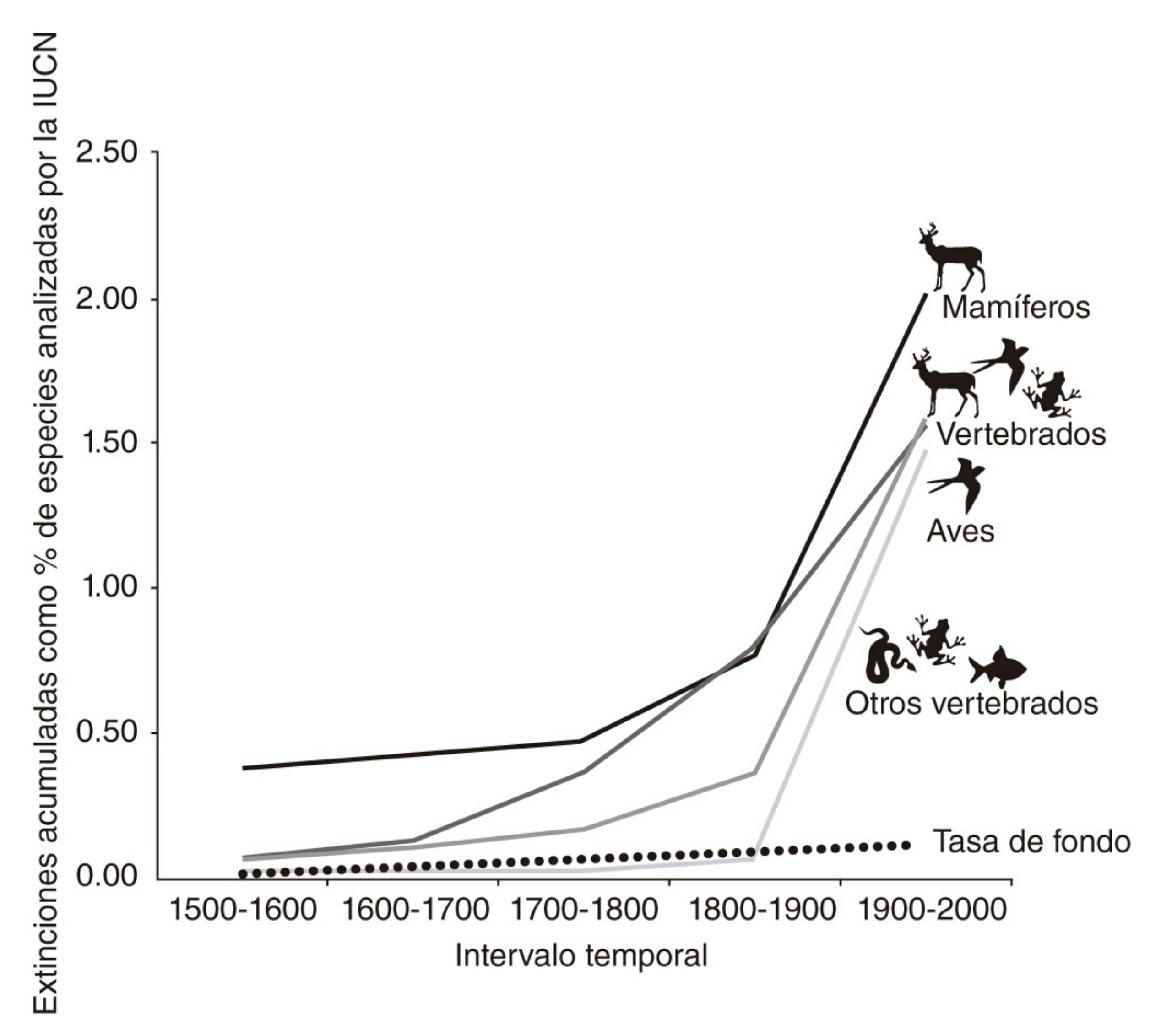
ambientales abióticas y la frecuencia de incendios y otras perturbaciones a lo largo del tiempo. Cuando se toma este rango histórico como referencia o «línea de base», los cambios situados fuera de ese rango evidencian un cambio significativo desde un punto de vista ecológico.

La sexta extinción masiva

La extinción de especies es uno de los cambios ecológicos más trascendentes que han generado las sociedades humanas. Las causas son múltiples y variadas. La sobreexplotación se remonta al Pleistoceno y sigue siendo importante. El uso del suelo para la agricultura y los asentamientos han sido durante mucho tiempo el causante más potente y continuo de las extinciones terrestres, y sigue siéndolo. La restricción, fragmentación y transformación de hábitats que conlleva la roturación limita los recursos disponibles para las poblaciones vulnerables y las divide en grupos más pequeños y menos viables, lo que incrementa la probabilidad de extinción. La introducción de especies alóctonas también ha sido determinante para la extinción de especies nativas, sobre todo en zonas insulares, donde las especies endémicas (aquellas que se encuentran en lugares muy localizados, a veces restringidas a una sola isla pequeña) han resultado ser las más vulnerables de todas. Introducciones como las ratas, los cerdos, los perros, los gatos y otras han resultado devastadoras para especies que no habían evolucionado para defenderse de ellas. Las célebres extinciones del dodo y de los árboles de la isla de Pascua, que en su día se atribuyeron en exclusiva a la sobreexplotación, se contemplan ahora como resultado en gran medida de que las especies introducidas se alimentaron de sus huevos y semillas, respectivamente. En tiempos más recientes, los contaminantes tóxicos, incluido el pesticida DDT, han situado a varias especies en peligro de extinción, sobre todo a las que ocupan la cúspide de la cadena alimenticia. El cambio climático global antropogénico se perfila ahora como un motor de extinción capaz de convertirse en el más importante de todos los tiempos, pues amplifica la ya potente mezcla de presiones antropogénicas que hay detrás de lo que se denomina cada vez más la sexta extinción masiva de la Tierra.

Las extinciones no son algo nuevo. El 99 % de todas las especies que han vivido en la Tierra se ha extinguido. Aparte de los cinco sucesos de extinción masiva que se han constatado, en su mayoría debidos a cambios globales en el clima por la actividad volcánica u otras fuerzas geológicas, se han producido numerosos episodios de extinciones menores, y también existe una tasa de

extinción de fondo bastante constante a lo largo de intervalos temporales prolongados. Para comprobar si el ser humano está provocando una extinción masiva es necesario, por tanto, comparar la tasa de extinción actual con las tasas de fondo del pasado: la línea de base histórica de las extinciones (figura 36). El ecólogo Stuart Pimm, el paleontólogo Tony Barnosky y otros han demostrado que la tasa actual de extinción de vertebrados, calculada en extinciones por millón de especies al año, es ahora al menos diez, y posiblemente hasta 1000, veces superior a la línea de base histórica, y ha aumentado de forma drástica en los últimos siglos.



36. Extinciones acumuladas de especies de vertebrados en relación con la tasa de fondo.

Son varias las razones que dificultan el cálculo del índice absoluto de extinción. Las tasas de extinción varían mucho según el grupo taxonómico. Los vertebrados, en especial los mamíferos y las aves, parecen especialmente vulnerables, mientras que la mayoría de los taxones vegetales parecen serlo

menos. De los 5 a 10 millones de especies pluricelulares que se calcula que hay en la Tierra, los científicos han catalogado menos de 2 millones, por lo que es probable que la mayoría de las extinciones se produzca antes de que llegue a conocerse la existencia de esas especies. En 2010, solo se había confirmado la extinción de 1200 especies en los últimos 400 años. Pero confirmar extinciones es mucho más difícil que confirmar si una especie sigue existiendo. Imagine que queremos demostrar que no hay chinches en Tokio: será mucho más difícil que confirmar su existencia. Más preocupante aún es la extinción diferida. Muchas poblaciones son ya tan escasas que la reducción de su acervo génico y otras limitaciones reproductivas vuelven inevitable su extinción futura. En el caso de las especies longevas, como los árboles, es posible que la disminución de las tasas de reproducción haya sentenciado ya a algunas especies aunque su población aún sea considerable. El castaño americano es un ejemplo de ello: sus antiguos tocones, derribados por una enfermedad fúngica procedente de Europa, siguen echando brotes, solo para volver a marchitarse una vez y otra sin lograr siquiera producir semillas.

La sexta extinción masiva de la Tierra aún no ha llegado. Sin embargo, las sociedades humanas están acelerando las tasas de extinción mucho más allá de las líneas de base históricas, sobre todo en el caso de los vertebrados. La sobrepesca masiva por parte de los buques factoría está reconfigurando con rapidez la biodiversidad y las cadenas alimenticias de océanos enteros y está causando una defaunación en el medio marino muy similar a la que provocaron nuestros antepasados en tierra. Si no se frenan estos índices de pérdida de especies, la ecología del Antropoceno estará marcada por la sexta extinción masiva en el planeta y por una reducción drástica de la biodiversidad de la biosfera.

Homogoceno

En 1958, Charles Elton publicó *The Ecology of Invasions by Animals and Plants* [«La ecología de las invasiones de animales y plantas»], una obra en la que llamó la atención sobre «una de las grandes convulsiones históricas de la fauna y la flora del mundo». La pérdida masiva de biodiversidad no era más que el principio. Con el transporte de especies por todo el mundo, el ser humano estaba eliminando las barreras geográficas que habían encauzado la evolución de las especies durante millones de años. En la década de 1980, Gordon Orians y otros ecólogos calificaron esta mezcla global de especies como el inicio de una nueva era que denominaron el «Homogoceno». Al

convertirnos en una especie global, estábamos arrastrando con nosotros al resto de la biosfera.

La humanidad ha introducido especies en regiones nuevas desde al menos el Pleistoceno tardío, cuando los pueblos cazadores-recolectores empezaron a propagar las especies que les gustaban. Sin embargo, lo más probable es que el comienzo real del Homogoceno se produjera cuando las sociedades humanas y sus redes de comercio a larga distancia se expandieron con el auge de la agricultura y se aceleraron con el intercambio colombino y el aumento de las cadenas de suministro a escala planetaria. Los patrones contemporáneos de introducción de especies son un reflejo de esta historia, pues los primeros países comerciales industrializados del norte experimentaron el mayor número de ellas, seguidos de los territorios que se industrializaron más tarde.

Las especies alóctonas o exóticas introducidas son preocupantes porque algunas han demostrado que son capaces de superar a las especies nativas al competir con ellas, de consumirlas en exceso y, en definitiva, de amenazar su supervivencia alterando sobremanera las comunidades bióticas y los ecosistemas que invaden. Por ejemplo, el kudzu, una enredadera procedente de Asia, se introdujo intencionadamente en América del Norte como planta ornamental y como alimento para el ganado. En pocas décadas, el kudzu pasó a conocerse como «la enredadera que se comió el Sur», pues cubrió bosques enteros y causó daños anuales superiores a 100 millones de dólares. El kudzu es solo una de los miles de especies identificadas como «especies exóticas invasoras» y más de 500 de ellas se han convertido en un problema en todo el mundo. Muchas plagas y enfermedades comunes de los cultivos, el ganado y la fauna silvestre se deben a especies introducidas que causan daños anuales por un valor estimado en 100 000 millones de dólares y que se consideran responsables de la extinción de casi el 40 % de todos los animales de los que se conoce la causa.

Sin embargo, no todas las especies introducidas producen daños así. Muchas se mantienen en un segundo plano o incluso son bienvenidas. En Europa, por ejemplo, las especies que se han naturalizado fuera de su área de distribución nativa antes de 1492 se diferencian como «arqueófitas» y se consideran «más nativas» que las que han llegado después, denominadas «neófitas», por mucho que se sepa que fueron introducidas por los romanos u otros pueblos. En la actualidad, las lombrices europeas superan en América del Norte a las lombrices nativas, muy poco comunes, pero pocos las consideran molestas a pesar de lo mucho que han transformado los suelos y

ecosistemas enteros. El concepto de área de distribución estable de especies nativas tampoco tiene mucho sentido fuera de los trópicos, y tal vez ni tan siquiera allí. Durante millones de años, las especies de la zona templada han migrado hacia el norte o el sur de los continentes siguiendo el ritmo de los ciclos de glaciaciones y periodos interglaciales. Ahora que el clima cambia más rápido que nunca, las especies se ven obligadas a desplazarse para sobrevivir. Al menos en la zona templada, las definiciones de lo autóctono frente a lo invasor se ven cuestionadas por un clima que cambia tan deprisa que permanecer en un mismo lugar representa el camino directo hacia la extinción.

La redistribución humana de tantas especies ha dejado ya un registro estratigráfico evidente de alteración ecológica transformadora en todo el planeta. Sin embargo, las huellas estratigráficas de esos cambios, en forma de nuevos conjuntos de especies en registros lacustres y otros depósitos materiales, pueden constituir también algunos de los marcadores más complejos y diacrónicos del cambio global antropogénico. El Homogoceno está ciertamente aquí, pero también está aquí, allí y en todas partes; una mezcla enmarañada de diferentes cambios en diferentes momentos que brinda numerosos marcadores, pero ni una sola señal coherente para marcar un límite inferior para el Antropoceno. Y también ha servido para dificultar infinitamente más la conservación y la restauración.

Líneas de base cambiantes

El enfoque clásico de la conservación y la restauración ha consistido en mantener o restaurar las poblaciones, los entornos y los hábitats para preservarlos en su estado «natural», que se define como una condición histórica de referencia o línea de base. Aun suponiendo que pudiera establecerse una línea de base histórica a partir de datos paleoecológicos u otros signos históricos, quedarían dos desafíos. El primero consiste en seleccionar la línea de base adecuada, y el segundo sería gestionar los ecosistemas para mantenerlos en su estado histórico o devolverlos a él. Ambos objetivos se ven dificultados por la alteración ecológica antropogénica a largo plazo.

En América del Norte y Australia, por ejemplo, los esfuerzos de restauración y conservación se aferraron durante mucho tiempo al «mito de lo prístino», definiendo las líneas de base históricas «naturales» como el estado previo al primer contacto con los europeos e ignorando, por tanto, las

transformaciones medioambientales provocadas por los pueblos nativos. Sin embargo, esta no es más que una de las muchas bases «naturales» posibles. ¿Eran más naturales las condiciones anteriores a la extinción de la megafauna a finales del Pleistoceno, o entre las diversas idas y venidas de las diferentes sociedades humanas a lo largo de milenios? La elección de una línea de base histórica específica entre las muchas posibilidades que existen es, por necesidad, más bien una cuestión de valores que de ciencia.

Desde un punto de vista práctico, las presiones antropogénicas han hecho casi imposible restaurar y mantener las condiciones de referencia históricas en muchas, cuando no en la mayoría, de las regiones del mundo. Las comunidades bióticas se están transformando por la pérdida de especies al mismo tiempo que se ven plagadas de especies invasoras. El efecto ha supuesto a menudo una ganancia neta en cuanto al número total de especies dentro de un paisaje o región, pero los recién llegados suelen ser malas hierbas, plagas y otros invasores comunes que incrementan tanto la biodiversidad como la homogeneización biótica. A una escala global, sin embargo, las especies se pierden por extinción mientras avanza el Homogoceno. Los cambios cada vez más veloces en el clima, y los suelos y otras condiciones ambientales abióticas no hacen más que sumarse a estos cambios en la biota e interaccionar con ellos. Así, por ejemplo, debido a la gestión de la irrigación, la sal se ha acumulado en algunos suelos de Australia Meridional, lo que ha favorecido invasiones de plantas exóticas que toleran la sal, algunas de ellas también adaptadas a temperaturas más cálidas, pero ha reducido la biodiversidad en general.

¿Es posible mantener un estado de referencia histórico cuando tanto las comunidades bióticas como los entornos abióticos se han apartado tanto de su rango histórico de variabilidad? En estas condiciones tan diferentes, el especialista en ecología de la restauración Richard Hobbs y otros han planteado que aferrarse a las líneas de base históricas puede entorpecer, más que facilitar, los esfuerzos de conservación y restauración. Los ecosistemas híbridos (en parte históricos y en parte nuevos) podrían restaurarse con eficacia para devolverlos a su estado histórico. Pero la restauración tradicional tiene pocas probabilidades de triunfar y es demasiado costosa para contemplarla en los «ecosistemas nuevos», donde las condiciones bióticas y abióticas se han apartado en exceso de sus niveles históricos.

El jardín bullicioso

En el Antropoceno, las líneas de base para la conservación y la restauración son cambiantes y están determinadas por los valores cambiantes y las condiciones ecológicas antropogénicas creadas y mantenidas por las sociedades humanas. ¿Qué significa hábitat natural o ecosistema natural cuando las comunidades de plantas y animales, y las relaciones que mantienen entre sí y con el entorno se han visto transformadas por historias previas de cambio social humano? ¿Qué significa ser una especie autóctona en un paisaje agrícola o en una ciudad, donde los suelos modificados, la vegetación dirigida, el exceso de nutrientes, la contaminación y otras condiciones alteradas por el ser humano son la norma y no una alteración?

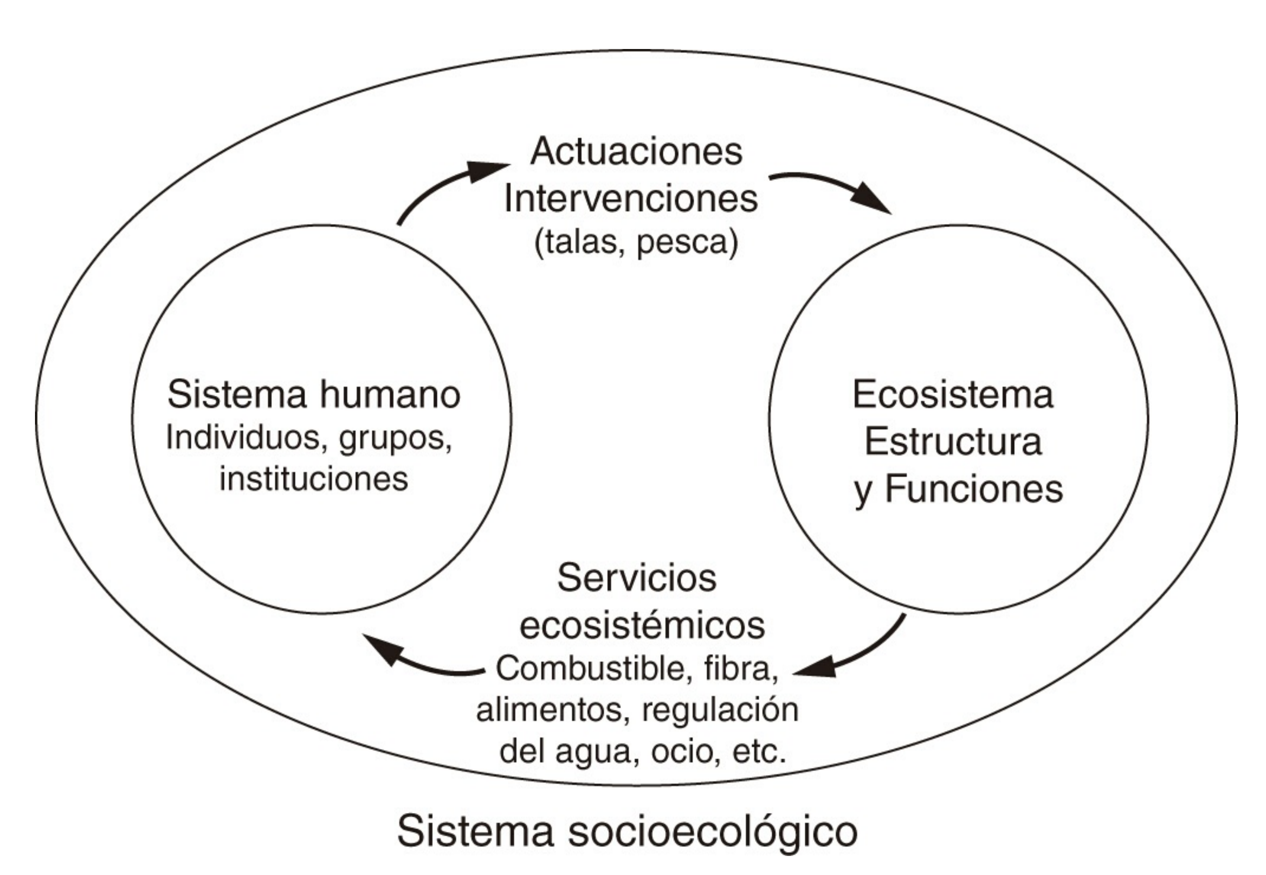
Usted tal vez se sorprenda al ver árboles que crecen en edificios abandonados (posiblemente el *Ailanthus altissima* que aparece en la novela *Un árbol crece en Brooklyn* de Betty Smith[4]), las malas hierbas que salen en las aceras o incluso que haya halcones que cazan ratas en zonas urbanas. Las especies están aprendiendo a vivir en entornos humanos, y algunas lo han hecho muy bien. Siguiendo esta misma línea, se ha descubierto que las especies de aves con cerebros más grandes, como los cuervos, por ejemplo, se desenvuelven mejor en entornos humanos complejos como las ciudades. Hasta hay signos de que la introducción de especies exóticas está acelerando la aparición de especies nuevas. El ecólogo Chris Thomas ha evidenciado que en Gran Bretaña los rododendros europeos se han cruzado con sus parientes de América del Norte para dar lugar a nuevas poblaciones silvestres, y que ha surgido un híbrido de dos especies de mosca de la fruta capaz de colonizar las madreselvas invasoras en América del Norte.

Pero lo más importante es que las sociedades humanas están recuperando y aprendiendo a convivir con especies que antes mataban alegremente, tal como atestiguan el regreso del lobo a sus antiguos territorios de caza en Europa y de los osos negros, los pumas y coyotes en Estados Unidos. La vida sigue proliferando en lo que la escritora Emma Marris ha llamado el «jardín bullicioso» del Antropoceno, en el que ecosistemas nuevos conforman la nueva naturaleza. En una biosfera cada vez más antropogénica se están formando nuevas relaciones. Las sociedades, las personas, la vida salvaje y ecosistemas enteros están coevolucionando y dando lugar a nuevas formas de naturaleza, aparte de conservar y recuperar las anteriores.

Sistemas socioecológicos

Los ecólogos estudian cada vez más las causas y consecuencias del cambio ecológico antropogénico y despliegan nuevos paradigmas que incluyen el acoplamiento entre el sistema humano y el natural. En la década de 1950, el ecólogo Howard Odum remarcó la dependencia humana de los ecosistemas en el libro de texto que ayudó a convertir la ecología en un vocablo conocido en las décadas de 1960 y 1970. Asimismo estudió la «sucesión de viejos campos agrícolas», es decir, la recuperación de la vegetación en tierras de labor abandonadas. En 1962, Rachel Carson brindó al público general una visión ecologista de las consecuencias globales del empleo de productos químicos industriales en su obra *Primavera silenciosa*[5]. La investigación de los ecosistemas en la cuenca hidrográfica de Hubbard Brook condujo al descubrimiento de la lluvia ácida en la década de 1970. Y en 1986, Peter Vitousek dio la vuelta al mundo con su estimación de que los seres humanos se estaban «apropiando» de casi el 40 % de la fotosíntesis terrestre mediante la tala de bosques y el uso de la tierra con fines agrícolas. Antes de que Crutzen propusiera el Antropoceno, Vitousek defendió la idea de una Tierra remodelada por la humanidad en su clásico artículo de 1997 publicado en *Science* y titulado «Human Domination of Earth's Ecosystems» [«Dominación humana de los ecosistemas de la Tierra»].

A finales de la década de 1970 los ecólogos incorporaron cada vez más al ser humano en sus investigaciones, y colaboraron con especialistas en ciencias sociales para investigar la vinculación entre los procesos sociales y los ecológicos. La ecología urbana, la ecología industrial y la agroecología surgieron como subdisciplinas diferenciadas, y los especialistas en ecología del paisaje, biología de la conservación y otras disciplinas ecológicas aplicadas introdujeron en su trabajo los ecosistemas gestionados. En la década de 1990, Carl Folke creó un marco de referencia bastante aceptado para los «sistemas socioecológicos» que aceleró la colaboración entre ecólogos y especialistas en ciencias sociales para resolver problemas del mundo real relacionados con la gestión medioambiental y el cambio social (figura 37). La economía ecológica (que prioriza la ecología), la economía ambiental (que prioriza la economía) y otras disciplinas relacionadas con la ecología introdujeron herramientas novedosas para abordar los problemas de la gestión medioambiental, incluido el reconocimiento, la medición y la gestión de los «servicios ecosistémicos», es decir, los beneficios que proporcionan los ecosistemas a la humanidad, como la polinización, el agua potable y las oportunidades recreativas.



37. Diagrama que ilustra la interacción combinada de los sistemas socioecológicos.

Los ecólogos también han expandido su trabajo con la introducción en la década de 1990 de modelos de una «biosfera activa» en las simulaciones del sistema Tierra, lo que supuso un gran avance frente a los modelos que daban por sentado que la vegetación permanece intacta incluso ante un cambio climático importante. Imaginemos que los árboles se vieran obligados a vivir en desiertos y que el ciclo global del carbono dependiera en exclusiva de la física.

Ecólogos, economistas y geógrafos, entre otros, están desarrollando planteamientos para observar, entender y modelar una ecología global modificada de forma activa por las sociedades humanas, incluyendo las variaciones en el uso del territorio por parte del ser humano, que son el mayor impulsor de la alteración de la biodiversidad y de las emisiones de carbono antropogénicas a la atmósfera hasta 1950.

La biosfera antropogénica

Los patrones globales de los ecosistemas terrestres del planeta se han visto condicionados durante mucho tiempo por el clima, el terreno, los suelos y otras restricciones ambientales abióticas a las que se han adaptado las

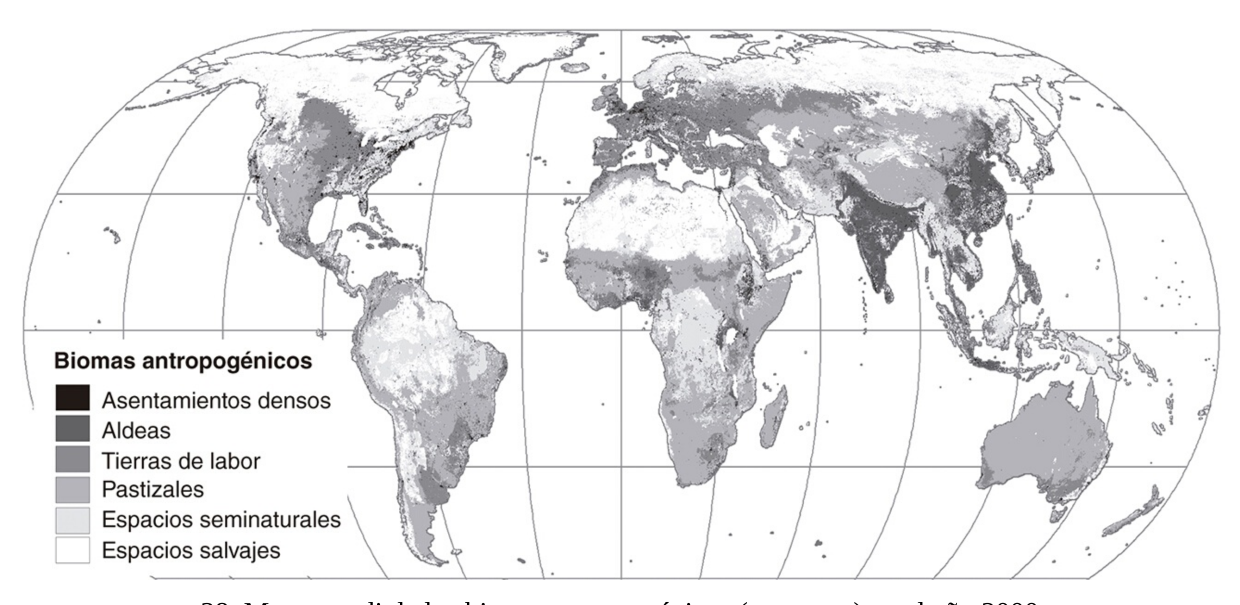
especies. Los desiertos están poblados por plantas adaptadas a entornos secos, las especies que viven en las selvas tropicales disfrutan con el calor y la humedad, y el tipo de vegetación varía desde la base hasta la cima de las montañas elevadas. Alexander von Humboldt fue el primero en describir este patrón ambiental global de la vida a comienzos del siglo XIX, lo que impulsó el desarrollo de la disciplina de la biogeografía a principios del siglo XX. A mediados de la década de 1930, los ecólogos describieron estos patrones globales como «biomas», o patrones ecosistémicos a escala global, situados un nivel por debajo de la mayor escala de todas, la biosfera.

A medida que los ecólogos fueron admitiendo una biosfera cada vez más antropogénica, se esforzaron por dilucidar los patrones globales de la ecología modelada por el ser humano. En la década de 1990, la teledetección por satélite aportó los primeros mapas planetarios de la cubierta vegetal, que también incluía cubiertas antropogénicas, como los cultivos y las superficies artificiales y hasta el fulgor de la iluminación nocturna. En 2002, el ecólogo Eric Sanderson combinó estos datos con mapas de carreteras y densidad de población humana para trazar un índice del creciente influjo humano, mientras que dejó las zonas salvajes como áreas no afectadas por él. Los patrones globales de la transformación humana de la ecología, que se calcula que cubren más del 80 % de la tierra firme del planeta, se mostraban cada vez más claros, pero se siguieron viendo como una mera alteración de un mundo, por lo demás, natural.

Pero, al comprobar que la mayor parte de la biosfera terrestre había sido reconfigurada por el ser humano, se hizo evidente la necesidad de conocer en profundidad los patrones ecológicos globales generados por las interacciones humanas con los ecosistemas. En 2007 trabajé con el geógrafo Navin Ramankutty para corregir esta circunstancia. Integramos datos sobre poblaciones humanas, el uso de la tierra para cultivos y pastos y la cubierta vegetal para trazar un mapa de los biomas antropogénicos de la Tierra, los cuales denominamos antromas (figura 38). Nuestros datos revelaron que en el año 2000, más del 75 % de la biosfera terrestre se había transformado en antromas, incluyendo zonas urbanas y otros asentamientos densos (en torno al 1 % del territorio sin hielo del planeta), localidades agrícolas (el 6 %), tierras de labor (el 16 %), pastizales (el 32 %) y espacios seminaturales sometidos a unas poblaciones humanas y un uso de la tierra menores (el 20 %). Todo ello dejaba los territorios salvajes libres de población humana o sin explotar reducidos a menos de una cuarta parte de la biosfera terrestre. En un trabajo posterior, demostramos que hace unos 8000 años aparecieron por primera vez

áreas significativas de antromas, y que entre 500 y 2000 años atrás cubrían más de la mitad de la biosfera terrestre, dependiendo de los datos históricos empleados, pero en su mayoría se trataba de territorios seminaturales. Solo en el último siglo, más de la mitad de la biosfera terrestre se ha transformado en antromas urbanos, rurales, agrícolas y destinados a pastos, sometidos a un uso más intensivo.

Una de las principales conclusiones de las evaluaciones de la transformación humana de la biosfera terrestre es que, incluso dentro de los antromas con más densidad de población y usados de forma más intensiva, que incluyen ciudades y pueblos, quedan zonas considerables que no soportan un uso intensivo, a veces de forma intencionada, como ocurre con los parques, pero sobre todo porque tanto agricultores como constructores evitan las montañas, las colinas y otros entornos menos adecuados para la agricultura y las infraestructuras. Como resultado, los paisajes antrópicos suelen ser mosaicos de terrenos usados intercalados con ecosistemas menos utilizados, en proceso de recuperación y remanentes que se han transformado por estar disgregados e incrustados dentro de paisajes explotados, y sometidos a la caza, la extracción de combustibles, invasiones de especies, contaminación y otras presiones humanas. Aunque solo el 40 % de la superficie terrestre tiene un uso directo para cultivos, pastos y asentamientos, eso ha transformado otro 35 % del territorio en ecosistemas diferentes, con comunidades bióticas y procesos ecológicos que se apartan desde hace tiempo de cualquier línea de base «natural» histórica.



38. Mapamundi de los biomas antropogénicos (antromas) en el año 2000.

Las sociedades humanas representan mucho más que una mera alteración para un mundo, por lo demás, natural. Los sistemas sociales humanos han emergido como una fuerza planetaria dentro del sistema Tierra: una antroposfera que está moldeando y sosteniendo de forma activa una biosfera antropogénica. Las redes sociales humanas están ahora entretejidas a escala planetaria dentro de la trama de la vida. Las decisiones tomadas en un lugar pueden cambiar la ecología en las antípodas del orbe, e incluso a una escala mundial; los sistemas humanos y naturales están globalmente «teleconectados». A medida que los seres humanos siguen construyendo su nicho en el planeta, la Tierra funciona cada vez más como un sistema socioecológico con un metabolismo social orientado a sustentar poblaciones humanas cada vez más ricas y exigentes. Más del 90 % de toda la biomasa de mamíferos de la Tierra se compone ya de seres humanos y animales domésticos. ¿Hasta dónde puede llegar esto? ¿No hay límites para la cantidad de personas ni para la transformación que es capaz de soportar la ecología de la Tierra?

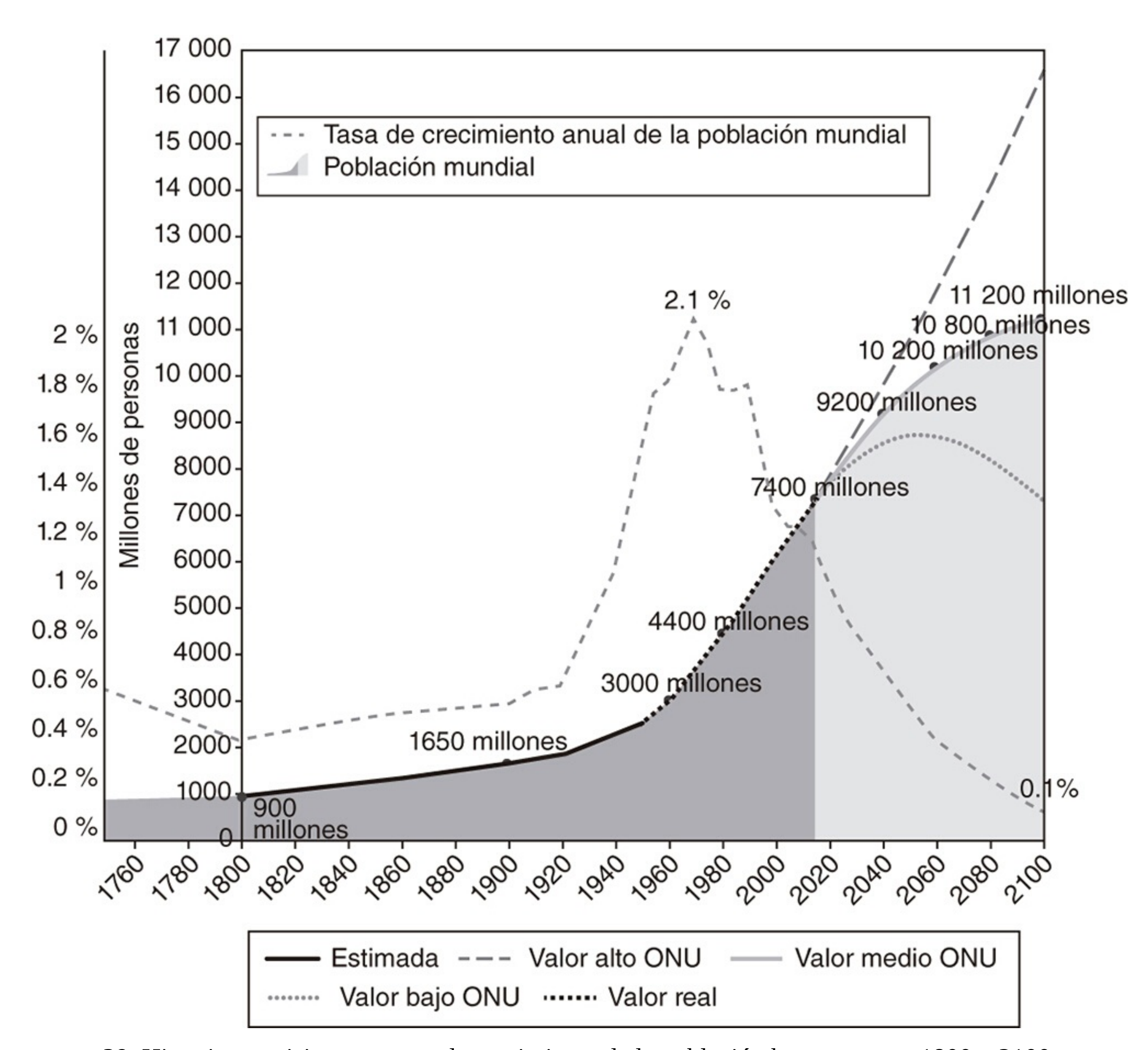
Los límites del crecimiento

Mucho antes de que Thomas Malthus publicara su *Ensayo sobre el principio de la población*[6] en 1798, el interrogante de «cuántas personas es capaz de mantener la Tierra» ya se había planteado y respondido en numerosas ocasiones. Por ejemplo, Antoni van Leeuwenhoek calculó esa cifra en 13 400 millones en 1679. Sin embargo, desde que Darwin explicó su teoría de la selección natural utilizando el aforismo de Malthus de que las poblaciones están limitadas por la escasez de recursos, este concepto se ha vuelto capital en los debates científicos sobre las limitaciones del planeta para mantener las poblaciones humanas. En la década de 1920, la ecología formalizó este concepto con la expresión «capacidad de carga» (*K*), que se corresponde con los límites ambientales para el crecimiento de una población en un entorno determinado. Cuando una población crecía por encima de su capacidad de carga, se decía que el colapso era inminente.

La preocupación por los límites de la capacidad de carga humana en la Tierra llegó a su punto álgido en 1968 con el libro *The Population Bomb* [«La bomba demográfica»], de Paul Ehrlich, ecólogo de Stanford, quien predijo que «cientos de millones de personas morirían de hambre» en la década de 1970 debido a la superpoblación. En 1972, un influyente informe titulado *The*

Limits to Growth [«Los límites del crecimiento»], utilizó las primeras simulaciones por ordenador para explorar las graves consecuencias que tendría para el «equilibrio ecológico natural de la Tierra» el hecho de que las poblaciones humanas crecieran por encima de cierto «equilibrio global». En 1994, Ehrlich declaró que «la población actual de 5500 millones… ha superado con claridad la capacidad de la Tierra para mantenerla». Paul Ehrlich realizó importantes aportaciones a la ciencia de la ecología, pero las hambrunas que predijo aún no se han producido.

La población actual de la Tierra, superior a 7000 millones de personas, está mucho mejor alimentada, tiene mejor salud y vive más tiempo que en cualquier otro momento de la historia de la humanidad. Las tasas de crecimiento de la población se han reducido drásticamente desde la década de 1970 y siguen descendiendo (figura 39), sobre todo como resultado de la «transición demográfica», un proceso en el que las poblaciones más urbanas y con mayor formación académica tienden a tener familias mucho más reducidas. Las poblaciones humanas de la Tierra siguen siendo cada vez más urbanas y las tasas de crecimiento demográfico continúan bajando. Es posible que la población humana alcance los 16 000 millones de individuos en 2100 y siga creciendo, pero la predicción generalizada en demografía es que la humanidad se estabilizará en unos 11 000 millones de personas en 2100.



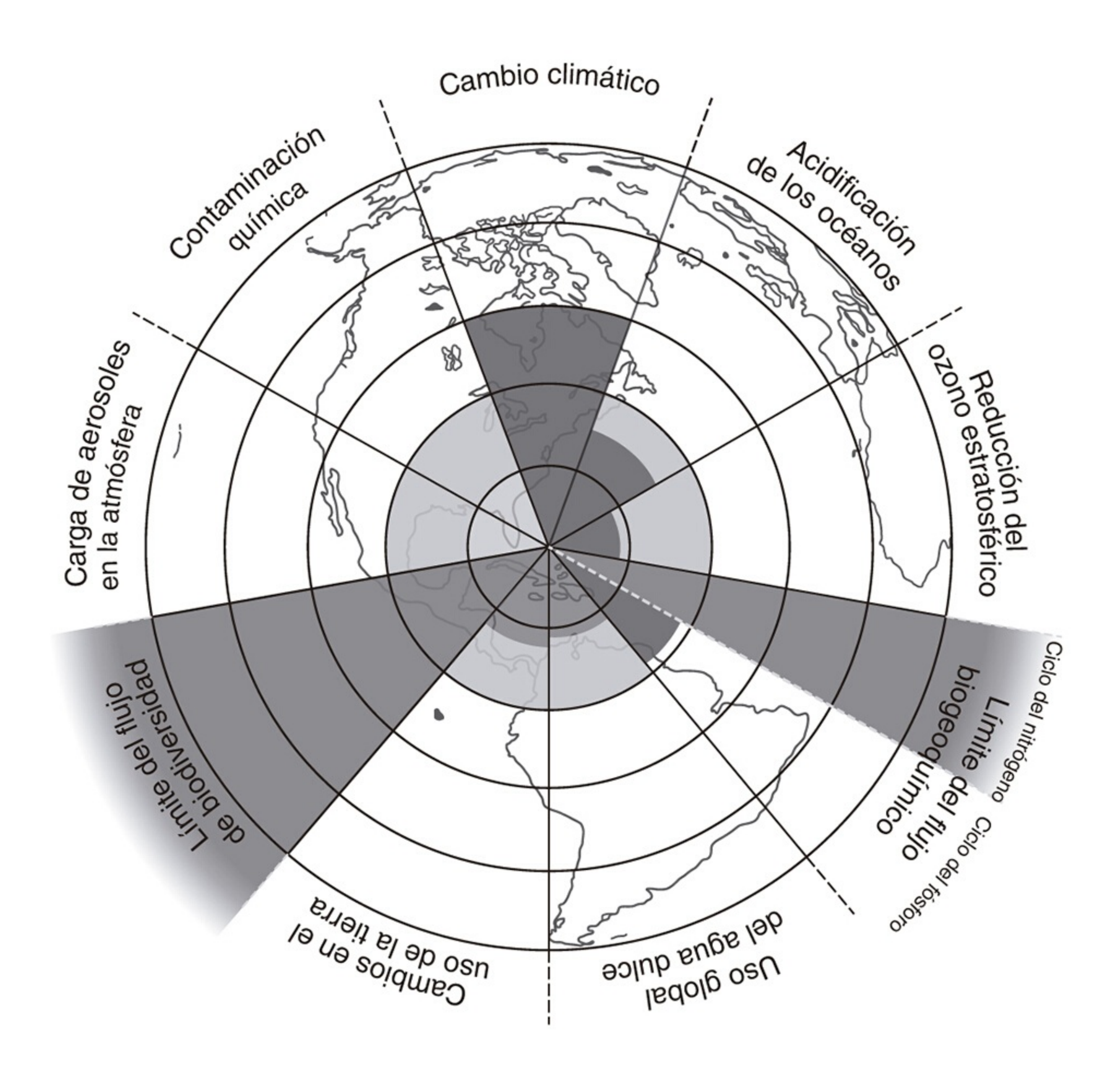
39. Historia, previsiones y tasas de crecimiento de la población humana entre 1800 y 2100.

Límites planetarios

Aunque el crecimiento demográfico se está frenando, las necesidades humanas de alimentos, agua, energía y otros bienes medioambientales siguen aumentando porque las poblaciones más ricas demandan cada vez más recursos planetarios. Así, una organización ecologista ha constatado que la humanidad utiliza hoy para mantenerse el equivalente a 1.6 veces el total de los recursos que produce la Tierra, lo que supone una «superación» insostenible de la capacidad de la Tierra para mantener la biología. Además, muchas personas del ámbito de la ciencia y otros sectores están preocupadas porque incluso los niveles actuales de población y demanda de recursos puedan estar dañando los sistemas de la Tierra «que sostienen la vida» de un

modo que tal vez se revele catastrófico en el futuro. La aceleración del cambio climático global no es más que una de las muchas catástrofes posibles.

En 2009, un grupo de científicos entre los que figuraban Will Steffen y Hans Joachim Schellnhuber, señaló en *Nature* nueve de estos cambios en el sistema Tierra, haciendo hincapié en los «límites planetarios» que no debemos franquear porque en caso de hacerlo «podría producirse una alteración ambiental inadmisible» (figura 40). Tomando como base el concepto de los puntos críticos del sistema Tierra que, si se traspasaran, podrían desplazar el planeta fuera de su «situación de estabilidad holocénica», la hipótesis de los límites planetarios plantea la posibilidad de que ocurran cambios catastróficos si se tensa demasiado el sistema Tierra.



40. Límites planetarios. En el caso de estas nueve variables medioambientales globales, el área de color gris claro indica «límites seguros», mientras que la parte sombreada en gris oscuro señala que se han superado dichos límites (pérdida de biodiversidad, cambio climático y alteraciones en el ciclo del nitrógeno).

En tiempos recientes se ha cuestionado la base científica de esta hipótesis y versiones posteriores de la misma, así como la posibilidad de que sirvan como argumento para la gestión medioambiental. Exceptuando el cambio climático, la pérdida de la capa de ozono y la acidificación de los océanos (capítulo 8), hay muy pocos signos de que haya puntos críticos en el sistema Tierra. Muchos de los cambios del sistema Tierra contemplados en este paradigma son acumulativos, debidos a la suma de variaciones locales y regionales, y no responden a cambios planetarios sistemáticos, como la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, que se sabe que generan puntos críticos. Desde una perspectiva política, es arriesgado fijar unos niveles supuestamente seguros para las alteraciones que sufre el planeta, sobre todo si esos niveles no están bien respaldados por conocimientos científicos, porque eso incitaría a pensar que por debajo de cierto umbral no sucederá nada grave, mientras que excederlo conllevará un cambio inevitable. Esta consideración conlleva el riesgo de generar complacencia por un lado y desesperanza por otro. Ambas cosas son inapropiadas: la pérdida de una sola especie es mucho más de lo que deberíamos aceptar a la ligera. Lo mismo ocurre con los hábitats locales. Aun así, los llamamientos para evitar la alteración de la Tierra de maneras que causen graves daños tanto a los seres humanos como al resto de la naturaleza han contribuido a trasladar estas profundas preocupaciones de la ciencia a un ámbito global.

Sin embargo, el gran interrogante sigue siendo el siguiente: si las sociedades humanas están actuando ahora como una fuerza global que está transformando la Tierra en detrimento tanto de la humanidad como del resto de la naturaleza, ¿qué hay que hacer al respecto, si es que hay algo que hacer? ¿De quién es la responsabilidad? ¿Quién debe actuar?

7. Politikós

En un influyente artículo de 2009 titulado «The Climate of History: Four Theses» [«El clima de la historia: cuatro tesis»], el historiador Dipesh Chakrabarty planteó la siguiente cuestión: «¿Es el Antropoceno una crítica de los relatos de libertad?». La formulación de esta pregunta ejemplifica hasta qué punto el concepto del Antropoceno ha ido más allá de sus orígenes dentro de las ciencias naturales. En las dos décadas transcurridas desde que Crutzen lo propuso por primera vez, el Antropoceno ha inspirado un aluvión de preguntas relevantes desde una perspectiva social, ha avivado intensos debates y ha inspirado cual musa a artistas y diseñadores.

Mientras los estratistas trabajan para definir un clavo dorado, otros especialistas se preguntan por el significado y las implicaciones de una nueva era del ser humano. La política de la desigualdad, la ética medioambiental y el desafío de actuar con responsabilidad ante un cambio global que puede acabar siendo catastrófico se han vinculado a la propuesta del Antropoceno. Incluso Stan Finney, expresidente de la Comisión Internacional de Estratigrafía, ha planteado si el Antropoceno no será más un alegato político que una necesidad científica.

La arrogancia

Para algunos filósofos, conservacionistas y hasta geólogos, el hecho de designar una época geológica como humana dice más sobre la arrogancia de nuestra especie y nuestro antropocentrismo que sobre cualquier cuestión científica. ¿Quiénes somos nosotros para poner nuestro nombre a un nuevo intervalo del tiempo geológico y por qué lo hacemos? La «Época atómica», el Homogoceno, el «Carboceno» (es decir, una época de los combustibles fósiles) son nombres que servirían para describir de manera amplia nuestra época. ¿Por qué elegir una designación que sitúe a nuestra especie en primer plano?

La socióloga Eileen Crist y otros especialistas han defendido que admitir una «era de dominio humano» solo sirve para justificar la apropiación y la

destrucción de la naturaleza por parte del ser humano, lo que allana el camino hacia proyectos más grandiosos para transformar todavía más la naturaleza. Incluso el geólogo Stan Finney manifestó su preocupación porque los esfuerzos por dar «oficialidad» al Antropoceno pretendieran crear una «mentalidad» política destinada a «tomar el control de la transformación actual». A este respecto, algunas voces han llamado la atención sobre el viejo interés de Paul Crutzen por la geoingeniería, la manipulación intencionada del sistema Tierra para controlar el cambio climático antropogénico. Según ellos, el reconocimiento formal de un planeta Tierra transformado por el ser humano, que es lo que supondría dar oficialidad al Antropoceno, podría ser el equivalente político a admitir que «vale todo» y a descartar cualquier esfuerzo por poner freno a la alteración humana de la Tierra por tratarse de algo inevitable e imposible. El naturalista Edward O. Wilson ha llamado «antropocenistas» a los defensores de esta idea, aunque no está claro a quién se refiere en concreto.

De forma análoga, la perspectiva de una época formal del Antropoceno ha inquietado a algunos conservacionistas, quienes consideran que eso sería reconocer que toda la naturaleza está «tocada por la humanidad», lo que transmitiría la falsa idea de que no queda nada natural que conservar. Con su oposición al Antropoceno señalan que declarar que toda la ecología de la Tierra está alterada por el ser humano exagera la magnitud de la modificación humana, al mismo tiempo que infunde «desesperanza en quienes se dedican a la conservación» del medio natural. Otros defienden que en una Tierra del Antropoceno seguiría existiendo una cantidad considerable de espacios «naturales» y que su rareza solo podría potenciar el valor de la conservación de la naturaleza. En cualquier caso, quienes sienten cierta preocupación por las consecuencias negativas de la reificación de una «era del ser humano» y una naturaleza profundamente transformada por la humanidad han esgrimido múltiples argumentos en contra de la admisión del Antropoceno.

Epocalipsis

Sin embargo, la interpretación más popular del Antropoceno tal vez sea que se trata de una transformación catastrófica del funcionamiento de la Tierra como sistema inducida por el ser humano. Desde este punto de vista, reconocer el Antropoceno equivale a reconocer las graves consecuencias globales del cambio climático, las extinciones masivas y otras alteraciones ambientales antropogénicas. En palabras del filósofo Clive Hamilton, «la

Tierra acaba de traspasar un punto de no retorno», una «fractura» en el funcionamiento del planeta que «debería alarmarnos». O, como ha escrito el geógrafo Erik Swyngedouw, «el Antropoceno no es más que otro nombre para insistir en la muerte de la Naturaleza». No reconocer formalmente el Antropoceno o interpretarlo de otra manera equivale, por tanto, a negar la trascendencia del cambio medioambiental global.

Los científicos especializados en el sistema Tierra han utilizado el Antropoceno como una especie de abreviatura para aludir a la transformación humana del funcionamiento de la Tierra como sistema. Sin embargo, el Antropoceno de por sí es una síntesis de los signos ya existentes y no una fuente nueva de indicios de estos cambios o sus consecuencias. Para los científicos en general, hay evidencias ricas, polivalentes, detalladas y sólidas (producto de varias décadas de investigación) de que el ser humano está provocando cambios potencialmente catastróficos en el funcionamiento de la Tierra como sistema. No hay ninguna necesidad de que haya una época del Antropoceno para entender o admitir esas alteraciones. De hecho, un número cada vez mayor de especialistas en ciencias de la Tierra, entre ellos Stan Finney, manifiesta una preocupación creciente por el hecho de que el reconocimiento de una época del Antropoceno pueda incluso estar desviando los esfuerzos científicos de objetivos más importantes, como entender mejor y resolver los desafíos específicos derivados del cambio climático global o las extinciones masivas. En palabras del geólogo James Scourse, «mientras los antropocenistas recolocan la silla del escritorio, otros científicos se dedican a intentar desentrañar la crisis a la que nos enfrentamos y a hacer algo al respecto».

Equiparar el Antropoceno con el cambio ambiental global antropogénico despierta otra inquietud: la posibilidad de que no se acepte como un nuevo intervalo del tiempo geológico. ¿Cuál sería entonces el mensaje?

A pesar de las abrumadoras pruebas científicas, la opinión pública de algunos países sigue dividida sobre la gravedad del cambio climático antropogénico, la aceleración de las extinciones y otras alteraciones medioambientales con serias consecuencias globales. ¿Cambiaría el reconocimiento científico del Antropoceno la percepción y actuación de la población general para evitar mejor o adaptarse a estos cambios? Igual que sucede con el propio Antropoceno, el jurado sigue deliberando.

Historias contrapuestas

Mucho antes de que C. P. Snow criticara las «dos culturas» que separan las ciencias y las humanidades, el estudio de la historia humana y de la natural se realizaba de forma independiente. Aunque los historiadores admitían que el ser humano puede alterar los entornos naturales y que el curso de la historia humana puede verse modificado por desastres naturales como inundaciones y sequías, se solía ignorar cualquier interconexión causal entre ambos. Las sociedades humanas ocupaban el centro del escenario, y los entornos naturales estaban de fondo.

En el artículo «Climate of History: Four Theses» [«El clima de la historia: cuatro tesis»], Dipesh Chakrabarty sostuvo que, con el cambio climático global antropogénico, la separación entre la historia humana y la natural había concluido para siempre. Al alterar el clima, los seres humanos se convirtieron en «agentes geofísicos» y en una «fuerza de la naturaleza» cualitativamente distinta a la que supusieron en el pasado, cuando los humanos interactuaban con la naturaleza tan solo como «agentes biológicos». Con el cambio climático, sostenía Chakrabarty, «el ahora geológico del Antropoceno se ha entrelazado con el ahora de la historia humana». Y con esta fusión, la naturaleza y la sociedad se han transformado en una sola cosa.

Aunque el artículo de Chakrabarty ha suscitado arduos debates en el ámbito de las humanidades, no fue él la primera persona que reconoció el artificio de separar la naturaleza de la sociedad. Dentro de la antropología, las teorías sociales críticas y la historia del medio ambiente, hay voces, como la de John McNeill, que llevan décadas relacionando la historia humana y la natural. En la actualidad se ha creado toda una disciplina dedicada a las humanidades ambientales sobre esta misma base. El reconocimiento por parte de Chakrabarty de una diferencia sustancial entre agentes geológicos y agentes biológicos también se ha criticado: la alteración de la biosfera modifica la atmósfera, el clima y otros procesos con toda seguridad, igual que la quema de combustibles fósiles.

Lo más preocupante para muchos, incluido el propio Chakrabarty, ha sido la necesidad implícita de entender el Antropoceno como la «historia de una especie» del «Ánthrōpos», lo que agrupa a cada persona de la Tierra en una sola masa indiferenciada, justo lo contrario de lo que ha estado haciendo la humanidad desde al menos la década de 1960. Chakrabarty llegó incluso a aceptar, si bien a regañadientes, la interpretación más extendida que hacen del Antropoceno las ciencias naturales, según la cual la humanidad como especie debería guiarse por los valores racionales de la Ilustración para hacer frente a los desafíos sociales y ambientales sin precedentes que plantea el

Antropoceno. No es de extrañar que estas narrativas sobre la «especie ilustrada» se hayan cuestionado para dar lugar a otros relatos y apelativos nuevos para entender el choque de las sociedades con la naturaleza.

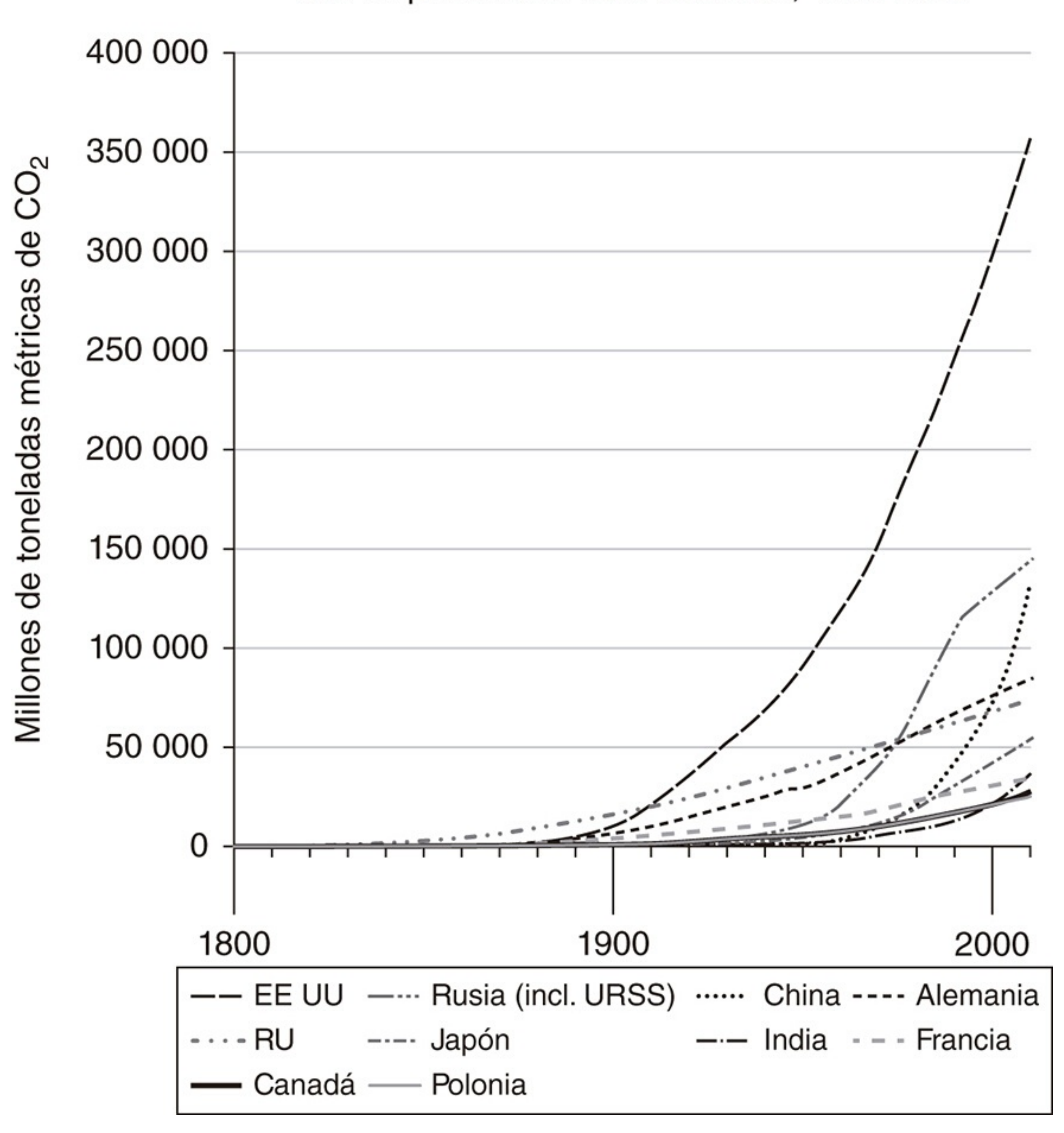
¿De quién es el Antropoceno?

Ninguna otra especie ha transformado la Tierra jamás tanto como nosotros (la gran oxigenación se debió a la intervención de decenas, cuando no miles de especies de cianobacterias). Incluso en grupos formados por pocos individuos, los cazadores-recolectores humanos causaron extinciones generalizadas y cambios en la biosfera que pudieron trastocar el clima de la Tierra. Sin embargo, durante decenas de miles de años, los humanos anatómicamente modernos no se comportaron de forma diferente a sus antepasados, y aquellas primeras alteraciones ambientales fueron insignificantes en comparación con las actuales.

Debe quedar claro que no hay una manera única de transformación de la Tierra por parte del ser humano. Cada persona utiliza y transforma el medio ambiente de un modo distinto, con unas consecuencias diferentes, y cada una experimenta estas consecuencias de una manera también distinta. ¿Ha quemado usted alguna vez carbón o cultivado trigo? Es poco probable. Sin embargo, es casi seguro que alguien lo ha hecho para usted. Los hogares, el consumo de recursos y la exposición a los peligros medioambientales son una función de la sociedad y el papel que desempeñamos dentro de ella. El modo de vida del ser humano en la Tierra, su nicho ecológico, está más condicionado por la sociedad en la que se desenvuelve que por su biología. Y las distintas sociedades utilizan y transforman el medio ambiente de formas muy diversas.

Incluso ahora, cuando las sociedades humanas están más interconectadas que nunca, se dan diferencias notables en el empleo de los recursos por parte de cada sociedad. Las emisiones de dióxido de carbono de los tres países más poblados del planeta son ilustrativas de ello (figura 41). En 2014, China, con 1400 millones de habitantes, emitió 10 500 millones de toneladas (Gt) de CO_2, o unas 7.6 toneladas per cápita. Los 320 millones de habitantes de Estados Unidos emitieron 5.3 Gt, que se corresponde con 16.7 toneladas per cápita. Los 1300 millones de habitantes de India generaron 2.3 Gt de CO_2, es decir, en torno a 1.6 toneladas per cápita. Aunque China emite el doble de CO_2 que Estados Unidos, cada habitante medio de China produce la mitad de

emisiones que el estadounidense medio. El habitante medio de India genera tan solo una décima parte, y en algunos países de África, 100 de sus habitantes generan menos emisiones que un ciudadano medio estadounidense. Y las diferencias dentro de cada país llegan a ser igual de notables. Por ejemplo, cada persona adinerada de las zonas urbanas llega a generar diez veces más emisiones o incluso una cantidad mayor que la población pobre de zonas rurales. Y los 1000 millones de personas más pobres de la Tierra no emiten casi nada de carbono fósil.



41. Acumulación de emisiones de carbono entre 1800 y 2010.

¿Es correcto decir que el *Homo sapiens* en su conjunto está causando un cambio climático global veloz? Está claro que no. Los países ricos y las personas ricas utilizan mucha más energía y emiten mucho más dióxido de carbono que los pobres. Viajar en coche privado y en avión, algo que la mayoría de los habitantes de la Tierra no ha hecho nunca, son algunas de las actividades que más energía consumen por parte del ser humano. Y hasta hace muy poco, prácticamente toda esta energía procedía de combustibles fósiles baratos y abundantes. Eso trajo como consecuencia estilos de vida ricos e intensivos en emisiones de carbono para algunos, y una atmósfera saturada de carbono para todos.

El cambio climático global no acabará si no se pone fin a las emisiones de carbono derivadas del empleo de combustibles fósiles. Pero si no disponemos de otras fuentes de energía baratas, es muy posible que los combustibles fósiles sigan siendo el único camino para alcanzar la riqueza. Impulsada por una economía industrial en auge, China dejó de ser un país pobre para pasar a ser el motor económico del mundo, por delante de Estados Unidos, lo que la convirtió en el mayor emisor anual de dióxido de carbono del planeta alrededor del año 2005. De acuerdo con las emisiones actuales, es fácil señalar a China como la principal generadora del cambio climático global. Sin embargo, esta apreciación simplista oculta desigualdades más profundas. China no empezó a quemar grandes cantidades de combustibles fósiles hasta la década de 1980, cuando empezó a propulsar su avance hacia la riqueza industrial. Estados Unidos alcanzó niveles similares un siglo antes, y Reino Unido varias décadas antes que este último. Incluso en el momento actual a China le queda un buen trecho por recorrer antes de igualar las emisiones totales de Estados Unidos desde el año 1850 (figura 41). Además, la producción china de bienes destinados a su exportación al resto del mundo representa un tercio de sus emisiones totales. De modo que ni tan siquiera las emisiones actuales de China son solo suyas.

Capitaloceno

Asignar a un intervalo temporal un nombre vinculado al ser humano parece culpar a todas las personas en general de la transformación del planeta. Pero los habitantes humanos de la Tierra jamás han transformado el planeta por igual. Las personas más ricas de las sociedades más ricas son las principales causantes del veloz cambio climático global. Culpar a todos por igual es como culpar a un banco de sufrir un robo en sus oficinas. Hay miles de millones de

personas que jamás han utilizado energía fósil barata para aligerar el peso que soportan.

Culpar al ser humano en su conjunto también evita la pregunta más importante de todas. ¿De dónde viene toda esta desigualdad? El cambio medioambiental antropogénico es un proceso social. Una sola persona basta para accionar el interruptor de la luz, pero se necesita toda una sociedad para mantener las luces encendidas. Las desigualdades en la transformación humana del medio ambiente no son más que un reflejo de las desigualdades que imperan dentro de las sociedades y entre ellas, todas ellas derivadas de procesos sociopolíticos y económicos.

Una de las alternativas al Antropoceno de las que más se habla atribuye la culpa directa a una sola transformación social. Para el especialista en ecología humana Andreas Malm, el geógrafo Jason Moore y el antropólogo Alf Hornborg, denominar Antropoceno a nuestra época desvía la atención del verdadero culpable del cambio ambiental antropogénico.

Según señaló Jason Moore en 2014, el Capitaloceno comenzó con «un punto de inflexión en la historia de la relación de la humanidad con el resto de la naturaleza, uno mayor que cualquier otro punto de inflexión desde el nacimiento de la agricultura y las primeras ciudades, y en términos relacionales, mayor que el desarrollo de la máquina de vapor». El capitalismo, y no la industrialización, fue lo que provocó la transformación de la Tierra mediante la creación de inmensas desigualdades sociales que respaldaron «audaces estrategias de conquista global, de mercantilización sin fin y de racionalización implacable».

Malm fue más allá al afirmar que «la desigualdad distributiva es una condición indispensable para la propia existencia de la tecnología moderna basada en los combustibles fósiles». Y la activista Naomi Klein lo expresó con más crudeza aún:

> Los combustibles fósiles requieren espacios de sacrificio: siempre hay alguno. Y no es posible tener un sistema basado en espacios de sacrificio y personas sacrificadas a menos que existan y persistan teorías intelectuales que justifiquen esos sacrificios: desde la doctrina del destino manifiesto hasta la *terra nullius*, pasando por el orientalismo… De este modo, los sistemas que ciertos humanos crearon, y a los que otros humanos oponen una resistencia tenaz, quedan completamente libres de culpa. El capitalismo, el colonialismo, el patriarcado…, esta clase de sistemas.

Sobre esta base, las voces defensoras del Capitaloceno han criticado las interpretaciones del Antropoceno procedentes de las ciencias naturales como «ahistóricas y apolíticas». Describir el cambio medioambiental global como el producto de una humanidad indiferenciada oculta las realidades políticas

que hay detrás de estos cambios, incluyendo quién se beneficia y quién sale perdiendo. En *The Shock of the Anthropocene* [«El impacto del Antropoceno»], publicado en 2016, los historiadores Christophe Bonneuil y Jean-Baptiste Fressoz van más allá y definen este desprecio por la política como mucho más que un simple descuido ingenuo. En su opinión, las elites responsables de dañar el medio ambiente siempre han sido conscientes de sus consecuencias negativas y siempre han trabajado para ocultarlas a la opinión pública.

Aunque es difícil determinar hasta qué punto se facilitó el cambio ambiental antropogénico con el encubrimiento de sus consecuencias, no cabe duda de que esos ocultamientos se han producido. Por ejemplo, la historiadora de la ciencia y miembro del AWG Naomi Oreskes ha documentado de qué manera las principales empresas de la industria de los combustibles fósiles ocultaron los primeros conocimientos que tuvieron sobre el cambio climático antropogénico y financiaron campañas para sembrar dudas sobre sus fundamentos científicos.

Aún más preocupantes para quienes sienten inquietud ante una conspiración del Capitaloceno son las interpretaciones del Antropoceno que consideran que un «despertar» humano global frente a los peligros ambientales del Antropoceno da lugar a nuevos regímenes de gestión medioambiental global controlados por una tecnocracia al servicio de las elites. Estas narrativas no solo encubren las fechorías medioambientales de una elite capitalista hegemónica, sino que constituyen una estrategia política en sí mismas. Al aceptar el Capitaloceno y rechazar ese relato tecnocrático centrado en toda nuestra especie del Antropoceno, está apareciendo un espacio para dar cabida a estrategias más matizadas y basadas en la conciencia política para resolver los desafíos medioambientales globales y sin precedentes de la época actual.

Gobernanza

«Es necesario poner nombre al Antropoceno para que la gente pueda responsabilizarse de él», escribió el profesor de derecho Jedediah Purdy en su libro de 2015 *After Nature: A Politics for the Anthropocene* [«Después de la naturaleza: una política para el Antropoceno»]. Sin embargo, Purdy, como casi todos los demás, también subrayó que sigue sin haber una circunscripción política bien definida o una infraestructura de gobierno

preparada para afrontar los complejísimos y perversos desafíos socioambientales del Antropoceno.

Decir que los desafíos del Antropoceno son perversos no es calificarlos de malvados (aunque algunos bien podrían serlo), sino hacer hincapié en que constituyen ejemplos perfectos de lo que los responsables políticos denominan «problemas perversos», o sea, los que se caracterizan por la ausencia de soluciones conciliadoras, por tener soluciones que generan más problemas, soluciones que dan lugar a ganadores y perdedores, y por plantear dificultades para definir incluso cuáles son los problemas. Dos ejemplos sencillos de ello los encontramos en la pérdida de hábitat y en el cambio climático. En ambos casos, la creación de estos problemas arroja claros beneficios para algunos (producción de alimentos, energía barata) y genera un daño medioambiental que es difícil de calcular y que, al mismo tiempo, afecta a varios grupos humanos de forma diferente. Las tierras de labor pueden dejar de usarse de manera productiva para proporcionar hábitats a otras especies, pero en tal caso, ¿dónde produciríamos los alimentos? ¿Es mejor atajar las emisiones que generan los combustibles fósiles con tecnologías que eliminen el carbono, como las dedicadas a la captura y el almacenamiento del carbono? ¿O es mejor invertir en fuentes de energía alternativas, como la solar o la nuclear, para reemplazar los combustibles fósiles? ¿O tal vez una combinación de ambas soluciones? Y esto no es más que la punta del iceberg. ¿Quién gana, quién pierde, quién paga los costes y quién decide? En el Antropoceno, todas estas cuestiones permanecen estancadas encima de la mesa.

A primera vista podría parecer que sería necesaria una gestión medioambiental global para abordar los problemas medioambientales mundiales. Sin embargo, los esfuerzos emprendidos para resolver el cambio climático planetario a través de marcos de gestión internacional han generado, por el momento, más fracasos que soluciones. Aunque el Protocolo de Montreal y los acuerdos adoptados para su seguimiento han logrado en gran medida proteger la capa de ozono de la Tierra, un esfuerzo análogo para limitar las emisiones de dióxido de carbono en la década de 1990, el Protocolo de Kioto, ofrece un ejemplo claro de fracaso de gestión ambiental. El acuerdo internacional más reciente para prevenir el cambio climático, el Acuerdo de París de 2016, logró por primera vez el consenso internacional universal de que los seres humanos estamos provocando un cambio climático a escala mundial. Sin embargo, es probable que también sea el pacto internacional más laxo alcanzado hasta la fecha, ya que no incluye medidas

obligatorias ni compromisos vinculantes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las iniciativas emprendidas para atajar los problemas medioambientales mundiales siguen centradas en las leyes y acuerdos internacionales que incluyen la propuesta reciente de imponer «límites legales para permanecer dentro de los límites del planeta», así como iniciativas para ampliar el Derecho Internacional Marítimo. Sin embargo, el especialista en ciencias políticas Frank Biermann, presidente del Proyecto de Gobernanza del Sistema Tierra, ha defendido junto a otras voces que el Antropoceno exige nuevas estrategias de gestión que reconozcan que el ritmo, la escala y los procesos de cambio ambiental más recientes no tienen precedentes y mantienen entre sí una interconexión sorprendente, al tiempo que establecen una relación directa con las complejas desigualdades características tanto de las poblaciones humanas como de los cambios ambientales que ellas generan.

¿Es la gestión mundial la clave para resolver los problemas ambientales globales o son más importantes otros actores, como las empresas, las organizaciones no gubernamentales y los gobiernos municipales? ¿Debe ser democrática la gestión ambiental mundial (una persona, un voto) o debe depender de los gobiernos nacionales u otras instituciones? ¿Cómo deben acometerse las políticas que ofrecen soluciones para un sector de la sociedad y crean problemas en otro, como cuando las subvenciones para fertilizantes impulsan la producción de alimentos en una región y destruyen la pesca de bajura en otra? ¿Se pueden incluir las necesidades de las generaciones futuras en las políticas y la gestión actuales? ¿Y qué sucede con los derechos de los seres no humanos en un planeta cada vez más transformado para servir a los seres humanos?

Chthuluceno

Quizás la contranarrativa más desafiante del Antropoceno, incluso para pronunciarla, la ofrezca el «Chthuluceno», una propuesta de 2014 de la teórica feminista y filósofa de la ciencia Donna Haraway, publicada en formato de revista con el título «Anthropocene, Capitalocene, Plantationocene, Chthulucene: Making Kin» [«Antropoceno, Capitaloceno, Plantacionceno, Chthuluceno: generando parentesco»]. Para Haraway y un extenso grupo de compañeros de viaje dentro de las humanidades y las ciencias sociales, la concentración del Antropoceno en lo humano es un problema de por sí. Al reproducir un mundo imaginado bajo la supremacía

humana, el «pensamiento de especie» del Antropoceno debe desestabilizarse enfrentándolo a «otros mundos de pensamiento» que aparten el foco de los seres humanos y los entretejan en complejas redes de procesos sociales y ecológicos dentro de los cuales el papel principal corresponde a los seres no humanos.

Al admitir el Capitaloceno como una oposición útil frente al Antropoceno que aparta el foco de nuestra especie, Haraway también llama la atención sobre el Plantacionceno, caracterizado, como el clavo Orbis, por

> la devastadora transformación de diversos tipos de granjas, pastos y bosques gestionados por los seres humanos en plantaciones extractivas y cerradas, basadas en la mano de obra esclava y en otras formas de trabajadores explotados, alienados y por lo común desplazados de un lugar a otro.

Con el Chthuluceno, Haraway lleva su razonamiento mucho más lejos sirviéndose del mítico alienígena cósmico de múltiples tentáculos y naturaleza divina del escritor H. P. Lovecraft («Cthulhu») para simbolizar la impenetrable maraña e interconexión de lo que solo parecen ser seres individuales. Para crear esta visión, Haraway se basa en pruebas científicas recientes de que los individuos de la mayoría de las especies, cuando no de todas, son en realidad agregados funcionales de múltiples especies. Por ejemplo, cada persona contiene más microbios que células humanas en su organismo, sobre todo en el «microbioma» biodiverso del sistema digestivo. Para Haraway, la individualidad no es más que una ilusión.

Imaginar un mundo del Antropoceno sometido a la supremacía humana es admitir el paradigma «extincionista» que transformó la Tierra en primer lugar, sostiene Haraway. Reinventar al ser humano como un imaginario enmarañado dentro de un mundo más amplio de ensamblajes de diversas especies codependientes puede invertir las narrativas destructivas que han justificado y guiado la transformación humana de la Tierra. Para facilitar estos procesos de reinvención humana, Haraway lanza la consigna «¡haz parientes, no hijos!», lo que abarca como parientes a todos los «bichos» de la Tierra, incluidos todos los seres humanos, a través de nuestra ascendencia común para englobar toda la vida junta dentro de la biosfera.

Aunque Haraway aparta sus razonamientos del lenguaje científico de manera intencionada, parecen coincidir con el pensamiento sistemático de la ciencia del sistema Tierra en el que todos los organismos del planeta están interconectados funcionalmente entre sí y con los entornos abióticos de la Tierra a través de ciclos biogeoquímicos y flujos de energía, lo que da lugar a la aparición de sorprendentes dinámicas no lineales.

La profunda perspectiva socioecológica del Chthuluceno también pone de manifiesto una de las cuestiones éticas más complejas del Antropoceno: si el ser humano tiene algún derecho a cambiar la Tierra en primer lugar. Al confrontar el Antropoceno con el Chthuluceno, Haraway acude al rescate de una comunidad más amplia de movimientos sociales «posthumanistas» que rechazan las «jerarquías entre especies» en pos de nuevas formas de bioética que incluyen la liberación animal, una «Agenda de los Animales» y el reconocimiento de un «valor intrínseco de la naturaleza» que trasciende los sistemas de valoración humanos. Tal como escribió la profesora de humanidades ambientales Ursula Heise, es hora de «una democracia más que humana que aparte la idea del Antropoceno de su enfoque exclusivamente humano». Y, en muchos sentidos, estos movimientos novedosos no hacen más que redescubrir los valores, las concepciones y los relatos culturales que han mantenido siempre muchas sociedades no occidentales.

Reflexiones

Como el Antropoceno favorece la conciencia de que el mundo que habitamos es cada vez más una creación nuestra, esta interpretación también está emergiendo como un «periodo de reflexión», un tiempo en el que la humanidad se replantea qué significa ser humano. Estas consideraciones han inspirado una efervescencia de ideas y expresiones artísticas que van mucho más allá de lo que imaginaron quienes propusieron el Antropoceno. Talleres, conferencias y otros encuentros están surgiendo tanto dentro como fuera del ámbito académico, lo que está ampliando la comunidad de estudiosos, pensadores y creadores que participan en la reinvención de la humanidad y la naturaleza.

Una de las iniciativas más amplias para fomentar nuevas reflexiones en torno al Antropoceno ha sido el Proyecto Antropoceno del centro Haus der Kulturen der Welt de Berlín (la HKW o «Casa de las Culturas del Mundo»), que empezó a funcionar en 2013. Esta Casa de las Culturas del Mundo, que cuenta con una financiación generosa por parte del gobierno alemán, ha organizado numerosas exposiciones y «encuentros» de académicos, artistas e intérpretes invitados de todo el mundo para desarrollar un «estudio cultural básico» conjunto que contemple como «premisa central de la tesis del Antropoceno» que «nuestro concepto de naturaleza ha quedado desfasado. La humanidad forma naturaleza».

Como participante invitado en el encuentro inaugural de «Apertura», me sorprendió la gran variedad de interpretaciones del Antropoceno que se presentaron allí. Mi propia intervención sobre «algo» relacionado con el Antropoceno se centró en una «roca» formada a partir de restos metálicos fundidos que había encontrado cuando era adolescente, y en un ladrillo roto que porta el nombre de su fabricante procedente de una muralla china demolida. Jan Zalasiewicz también asistió y presentó un gato vivo, y tanto Dipesh Chakrabarty como Will Steffen dieron sendas conferencias. Mientras mantuve un debate público junto a Emma Marris en torno a la pregunta «¿Es bello el Antropoceno?», recuerdo que me dolió perderme la actuación de un hombre desnudo que, según me contaron después, se había transformado en un felino salvaje al mismo tiempo que un zorro salvaje de verdad corría por el escenario. El Antropoceno se había convertido en un mundo nuevo muy extraño en realidad. La HKW también ha acogido un «Campus del Antropoceno» y ha elaborado un «Plan Curricular del Antropoceno», y sigue apoyando todo el trabajo que se realiza en relación con este tema. Tengo una camiseta de uno de estos encuentros con la leyenda «¿Cuándo estamos?». En un raro cambio de las tornas entre las artes y las ciencias, la HKW también acogió la reunión científica inaugural del AWG, que no dispone de fondos propios para ello.

El Antropoceno ha aparecido en libros con títulos como «Arte en el Antropoceno», «Arquitectura en el Antropoceno», «El nacimiento del Antropoceno», «Aventuras en el Antropoceno», «Aprender a morir en el Antropoceno», «El amor en el Antropoceno», y un volumen de poesía titulado «El Misantropoceno». Hay una obra instrumental titulada *Deep Anthropocene* [«Antropoceno profundo»], del músico Brian Eno, y una canción titulada «Anthrocene», de Nick Cave & The Bad Seeds. Existe un álbum muy conocido de heavy metal titulado «The Anthropocene Extinction» («La extinción del Antropoceno», del grupo Cattle Decapitation) que porta ilustraciones de paisajes postindustriales apocalípticos plagados de cadáveres humanos que desprenden desechos de plástico. Hay varios documentales dedicados al Antropoceno y algunos más en proceso de producción.

Parece existir un hilo conductor en las interpretaciones más creativas del Antropoceno: el Antropoceno como crisis. Una crisis de la naturaleza, una crisis de la humanidad, una crisis de significado, una crisis de conocimiento y, sobre todo, una crisis de acción. El Antropoceno exige acción.

8. Prometeo

En 1999 Hans Joachim Schellnhuber planteó la cuestión fundamental del Antropoceno: ¿por qué no habría de acudir Prometeo a socorrer a Gaia? Si es cierto que el ser humano está transformando la Tierra, ¿qué habría que hacer? O, para expresarlo con más humildad, ¿qué podríamos hacer? ¿Puede la humanidad ayudar a cambiar la trayectoria de la Tierra para colocarla rumbo a mejores resultados tanto para la humanidad como para la naturaleza que no es humana?

La ciencia es clara. El bienestar humano mejora en general al mismo tiempo que nuestras sociedades generan con rapidez un planeta más caliente, más contaminado, menos biodiverso y menos predecible. Todo el sistema Tierra se está viendo forzado hacia un estado sin ninguna equivalencia a lo largo de toda su historia y que introduce la posibilidad real de que se produzcan cambios ambientales tan veloces y tan potentes que ni siquiera las sociedades más capacitadas de la Tierra logren sobrevivir a ellos. Seguir por esta senda es jugarnos el futuro mismo de las sociedades humanas y del resto de la vida del planeta.

Lo que está en juego, al margen de las disciplinas de la geología y la estratigrafía, es una interpretación nueva del lugar que ocupamos dentro de la naturaleza, de nuestra relación con el resto del planeta. Este replanteamiento suscita algunas preguntas difíciles, como ¿qué estamos haciendo exactamente con nuestro planeta? ¿Es esta una historia de destrucción sin sentido o una historia de despertar y redención? Está claro que apenas hemos empezado a desentrañar las múltiples dimensiones, variaciones y alternativas que podrían darse en el futuro del Antropoceno. ¿Y si a estas alturas la cuestión no es qué relato creer, sino la necesidad de que haya muchas narrativas diferentes del Antropoceno para interaccionar con la diversidad más amplia de necesidades humanas? Una interpretación única del lugar que nos corresponde en la Tierra nunca ha sido suficiente para la mayoría de las sociedades humanas.

¿Es posible que la aceptación del Antropoceno espolee la acción para avanzar hacia un futuro mejor? Para los editores de *Nature* que comentaron el encuentro sobre el Antropoceno celebrado en mayo de 2011 en la Sociedad Geológica de Londres, la respuesta fue un sí rotundo: «El reconocimiento

oficial del Antropoceno centraría las mentes en los problemas que se avecinan».

Dando en el clavo

El interés por el Antropoceno se mantuvo después de que Crutzen introdujera el término en el año 2000. Pero el trabajo en esta materia comenzó en realidad a partir de 2008, con la implicación de los especialistas en geología, y se precipitó a partir de 2011. A la reunión de Londres solo asistieron unas pocas docenas de personas, pero Zalasiewicz y sus compañeros habían hecho los deberes. En el número de marzo de la revista *National Geographic* se trató el Antropoceno. Los trabajos de los ponentes invitados se habían publicado poco antes en un número especial dedicado al Antropoceno de la revista *Philosophical Transactions of the Royal Society*, fundada en 1665 (tanto Newton como Darwin publicaron en ella). «Bienvenidos al Antropoceno», anunció la portada de *The Economist*.

En el número de enero de 2016 de la revista *Science*, el Grupo de Trabajo del Antropoceno (al que pertenecía yo mismo) presentó datos científicos que respaldaban la gran aceleración de mediados del siglo XX como la principal teoría científica para explicar la transición de la Tierra desde la época del Holoceno hacia el Antropoceno. Las extinciones, la deforestación, la domesticación, las invasiones de especies, la agricultura, el cultivo de arroz, los suelos antropogénicos y hasta la Revolución Industrial se analizaron y descartaron por ser episodios demasiado diacrónicos para definir un clavo de oro sincrónico a escala global para la nueva época propuesta para la escala de tiempo geológico (GTS). El Grupo de Trabajo del Antropoceno (o AWG, por sus siglas en inglés) también consideró y rechazó en el mismo artículo de *Science*, y en publicaciones posteriores, la propuesta del clavo Orbis de Lewis y Maslin, basada en la caída del CO_2 en 1610, debido al tamaño relativo de la señal y las dificultades para establecer una correlación global.

En el encuentro de agosto de 2016 del Congreso Geológico Internacional celebrado en Sudáfrica, se presentaron los resultados de una votación entre los 35 miembros del Grupo de Trabajo del Antropoceno, que evidenciaron un apoyo casi unánime a la aceptación del Antropoceno, y solo 3 votos en contra de su formalización. La propuesta de situar sus inicios a mediados del siglo XX también recibió un gran apoyo, aunque 4 miembros votaron a favor de un comienzo «diacrónico» del Antropoceno. Los votos a favor de marcadores

estratigráficos específicos variaron, de tal modo que 10 apoyaron la lluvia radiactiva de plutonio, 4 apoyaron el radiocarbono, 3 votos se emitieron a favor del plástico y 6 fueron abstenciones.

Fuera del Grupo de Trabajo del Antropoceno, el apoyo entre los especialistas en geología ha sido diverso. Las críticas varían, pero la inquietud más extendida, expresada por Stan Finney, Phil Gibbard (expresidente de la Subcomisión de Estratigrafía del Cuaternario de la ICS), William Ruddiman, Whitney Autin, John Holbrook y James Scourse, se corresponde con grandes dudas sobre la utilidad del Antropoceno para la ciencia de la geología. Tal como lo expresó Scourse en 2016

> Hay muchas formas de medir el tiempo y de establecer estratigrafías para la época en que el ser humano ha tenido un impacto progresivo en el sistema Tierra, como contar los anillos de los árboles, los radioisótopos introducidos por las pruebas de armas nucleares o las capas anuales en testigos de hielo. Utilizamos estas herramientas a diario y no tenemos ninguna necesidad de introducir el nuevo término.

Mientras escribo, el Grupo de Trabajo del Antropoceno sigue seleccionando posibles candidatos a GSSP entre las docenas de secciones halladas en sedimentos lacustres, turberas, glaciares, cuevas y otros depósitos estratificados. Si todo marcha como debe, no tardaremos en tener una propuesta formal de GSSP para el Antropoceno.

Ahondemos algo más

El Antropoceno sigue siendo controvertido en las numerosas comunidades académicas que estudian la alteración social y ambiental, las cuales incluyen no solo a especialistas en arqueología, sociología, geografía e historia ambiental, sino también en ecología y ciencias de la Tierra. La simple datación del Antropoceno constituye una preocupación común. Los signos de que el ser humano ha transformado la Tierra son abundantes en tiempos muy anteriores al siglo XX y podrían remontarse a finales del Pleistoceno. Pero la inquietud más generalizada guarda relación con lo que el arqueólogo Andrew Bauer ha denominado la «división del Antropoceno».

La estratigrafía divide el tiempo geológico en intervalos discretos por razones puramente pragmáticas, no porque considere que la dinámica de la Tierra es discontinua. Sin embargo, los esfuerzos por avanzar en el estudio científico de la transformación humana de la Tierra se centran intrínsecamente no en la identificación de límites temporales precisos, sino en

los procesos complejos, continuos, socialmente diferenciados, ecológicamente conectados e históricamente accidentales con los que las personas hemos ido causando esta transformación a lo largo del tiempo. Desde esta amplia perspectiva, es difícil ver que la división del tiempo geológico en dos partes alrededor del año 1950, como propone el Grupo de Trabajo del Antropoceno, o incluso 7000 años atrás, tal como han planteado algunas voces, ayude a avanzar en el empeño científico por comprender la transformación de la Tierra causada por el ser humano.

El arqueólogo Karl Butzer calificó el Antropoceno de «paradigma en evolución». Los arqueólogos Bruce Smith, Melinda Zeder y Tod Braje han propuesto que un intervalo temporal combinado del «Holoceno/Antropoceno» podría volver a colocar el foco en entender la transformación de la Tierra como un proceso socioambiental a largo plazo. En cualquier caso, los motivos de la transición de la Tierra hacia el Antropoceno son humanos y sociales. Aunque el Grupo de Trabajo del Antropoceno, dirigido por estratígrafos pero que también cuenta con especialistas en materias distintas a la geología, está dedicado a definir el Antropoceno como una unidad geológica siguiendo criterios geológicos, la comunidad más amplia de científicos sociales y ambientales tiene muchas razones para participar en su definición e interpretación, y tal vez necesite desarrollar definiciones alternativas y más amplias acordes con un planteamiento histórico más profundo del cambio socioambiental.

Tecnosfera

El Antropoceno también ha obligado a los geólogos a adoptar nuevas formas de observación y análisis. Ya se han identificado más de 170 000 «sustancias sintéticas de tipo mineral» producidas únicamente por las actividades humanas, desde chips de silicio para ordenadores hasta abrasivos industriales, pasando por cerámicas y vidrios antiguos, frente a los 5000 minerales «naturales» aproximados que existen. También se ha calculado el volumen total de la Tierra que ha transformado la humanidad, incluyendo suelos alterados por la agricultura y sedimentos oceánicos perturbados por la pesca de arrastre. La masa de 30 billones de toneladas de esta «tecnosfera física» es verdaderamente asombrosa: 100 000 veces mayor que la biomasa humana viva de la Tierra (aunque solo asciende a una fracción igual a uno entre 200 millones de la masa total de la Tierra). Los materiales plásticos por sí solos superan ya con creces la biomasa humana, y han pasado de 2 millones de

toneladas anuales en 1950 a 300 millones de toneladas en 2015. La producción total a lo largo de la historia, que asciende a 5000 millones de toneladas, bastaría para envolver toda la superficie de la Tierra con una fina capa de plástico.

Los geólogos también han empezado a analizar la formación de «tecnofósiles», desde ciudades, carreteras y plataformas petrolíferas hasta la asombrosa diversidad de artículos de plástico que se fabrican, desde carcasas de aparatos electrónicos hasta botellas de plástico y microfibras. Aunque el destino a largo plazo de las vigas de acero, el cableado eléctrico, los plásticos y muchos otros materiales antropogénicos sigue siendo incierto, su potencial para fosilizarse en los sedimentos de lagos y océanos, los vertederos y otros depósitos estratificados, así como la gran cantidad producida, garantizarían con creces su supervivencia en los estratos geológicos. En la actualidad, los tecnofósiles también están en órbita alrededor de la Tierra, reposan en su satélite natural y en varios planetas del Sistema Solar, y hasta han llegado al espacio interestelar.

La diversidad de «tecnoespecies» de artefactos culturales también podría permitir observar líneas temporales de alta resolución del cambio social en estratos futuros, en paralelo a la valoración de la «cultura material» por parte de los arqueólogos. La diversidad de las «tecnoespecies» puede superar ya la de los 10 millones aproximados de especies que viven en la Tierra. Las tecnoespecies de aparatos electrónicos, enseres domésticos y piezas industriales se cuentan casi con toda seguridad por millones. Los geólogos bien podrían empezar a utilizar «marcadores tecnoestratigráficos» para definir el tiempo geológico en el futuro.

Antroposfera

El Antropoceno también ha planteado desafíos nuevos a la ciencia del sistema Tierra, como la necesidad de representar los sistemas humanos y la antroposfera como componentes fundamentales del sistema Tierra, al mismo nivel que su biosfera, su atmósfera y los sistemas climáticos. La concepción de Schellnhuber de la segunda revolución copernicana incluía la antroposfera dentro de una «ecuación» del sistema Tierra que lo consideraba como realidad física y como «fuerza de control autoconsciente» metafísica: una inteligencia humana global que funciona como un sistema consciente, intencional y «teleológico» que guía la Tierra hacia resultados mejores. No fue el primero en proponerlo. El propio Vernadski consideraba que la cognición humana

constituye la «tercera fase» del desarrollo del sistema Tierra, que surge después de la geosfera y la biosfera como una «noosfera» globalmente consciente, basándose en el concepto introducido por el sacerdote y filósofo francés Pierre Teilhard de Chardin en la década de 1920. Teniendo en cuenta el estado actual de la Tierra, cabe preguntarse en qué estará pensando la noosfera.

Los modelos del sistema Tierra incorporan ahora representaciones cada vez más sofisticadas del cambio social humano y de las interacciones dinámicas entre la sociedad y el medio ambiente, como la alteración de los patrones económicos y agrícolas en respuesta al cambio climático. Aunque aún es pronto para estos modelos, el interés y las inversiones en este campo crecen con rapidez. La ciencia del sistema Tierra también está trabajando para conciliar sus modelos basados en procesos continuos con las unidades discretas del tiempo estratigráfico. Por ejemplo, la fotosíntesis causó un cambio de estado masivo en el sistema Tierra, aunque no se reconoce como un intervalo de tiempo dentro de la escala de tiempo geológico. Por otro lado, los estratígrafos separan el Holoceno del Pleistoceno aunque compartan la misma dinámica climática impuesta por la órbita terrestre, lo que no los diferencia en términos del sistema Tierra. El Holoceno solo es el más reciente de varias docenas de intervalos interglaciales. Teniendo esto en cuenta, el geólogo Ben van der Pluijm y algunos otros han planteado descartar el Holoceno por completo, aunque la mayoría de los geocientíficos lo consideran una división útil. Si se eliminara el Holoceno, el Antropoceno solo pondría fin al Pleistoceno cuando el forzamiento climático humano sobrepasara al forzamiento orbital como motor principal de la dinámica climática de la Tierra, lo que casi con toda seguridad ocurrió a mediados del siglo XX, y puede que pasara incluso antes. Desde el punto de vista del sistema Tierra, esa alteración no sería difícil de detectar; Will Steffen calculó que el calentamiento antropogénico es ahora al menos 170 veces más veloz que las tasas geológicas de fondo tomando como base una «ecuación del Antropoceno».

Tal como predijo Schellnhuber, ahora se pide a la ciencia del sistema Tierra que aporte mucho más que mediciones y predicciones. En 2015, el Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera se convirtió en «Future Earth», un nuevo programa de investigación internacional centrado en la ciencia de la sostenibilidad global en el que no solo los científicos, sino también los responsables políticos y los dirigentes empresariales, trabajan

juntos para establecer la agenda de investigación para mejorar la gestión ambiental. Prometeo ha sido llamado para ayudar a Gaia.

Geoingeniería

Ninguna forma de gestión ambiental es más prometeica que la «geoingeniería» del clima de la Tierra. Y en opinión de Paul Crutzen, la geoingeniería y el Antropoceno están íntimamente entrelazados. En 2002 escribió:

> No me cabe la menor duda de que, por tratarse de uno de los rasgos característicos del «antropoceno», las generaciones de «homo sapiens» de un futuro distante harán todo lo posible para evitar que se produzca una nueva edad de hielo introduciendo en la atmósfera gran cantidad de gases artificiales de efecto invernadero. Del mismo modo, cualquier caída de los niveles de CO_2 hasta concentraciones demasiado bajas que provoque una reducción de la fotosíntesis y de la productividad agrícola, se combatirá con la liberación artificial de CO_2.

Ya hay indicios de que las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han retrasado unos 100 000 años la próxima glaciación del planeta. Sin embargo, la geoingeniería climática nunca ha suscitado tanto interés como ahora. Cuanto más se caliente la Tierra, más costará combatir sus consecuencias, como la alteración de los sistemas de alimentación, la intensificación de las sequías, las olas de calor extremas, el ascenso del nivel del mar, los fuertes temporales y otros perjuicios para nuestras sociedades. Hasta la fecha, los esfuerzos de la humanidad no consiguen frenar el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Cuanto menos se haga ahora, más estarán dispuestas a hacer las sociedades futuras para enfriar el clima. Y la geoingeniería puede revelarse como la forma más segura para conseguirlo.

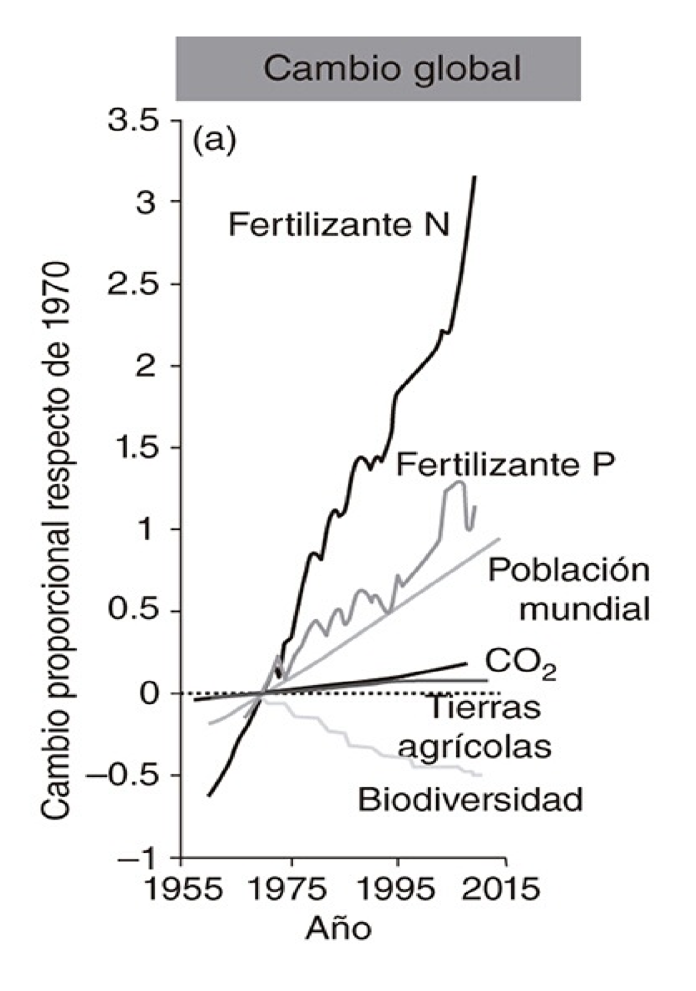
Las estrategias de geoingeniería climática incluyen la captación directa y el almacenamiento del CO_2 atmosférico («captación directa del aire»), la plantación de árboles, la reducción de la labranza del suelo, el enterramiento de carbón vegetal en el subsuelo («biocarbón») y la fertilización de los océanos, entre otras medidas para mejorar la captación y el almacenamiento del carbono biológico. Otra posibilidad consiste en enfriar la Tierra reflejando la energía del Sol hacia el espacio mediante «geoingeniería solar» (el «control de la radiación solar»), que incluye pintar de blanco las cubiertas de los edificios y lanzar espejos gigantes al espacio. De todas las propuestas de geoingeniería que se han planteado, la más discutida, la más viable económica y tecnológicamente y la que tiene más potencial transformador sigue siendo la

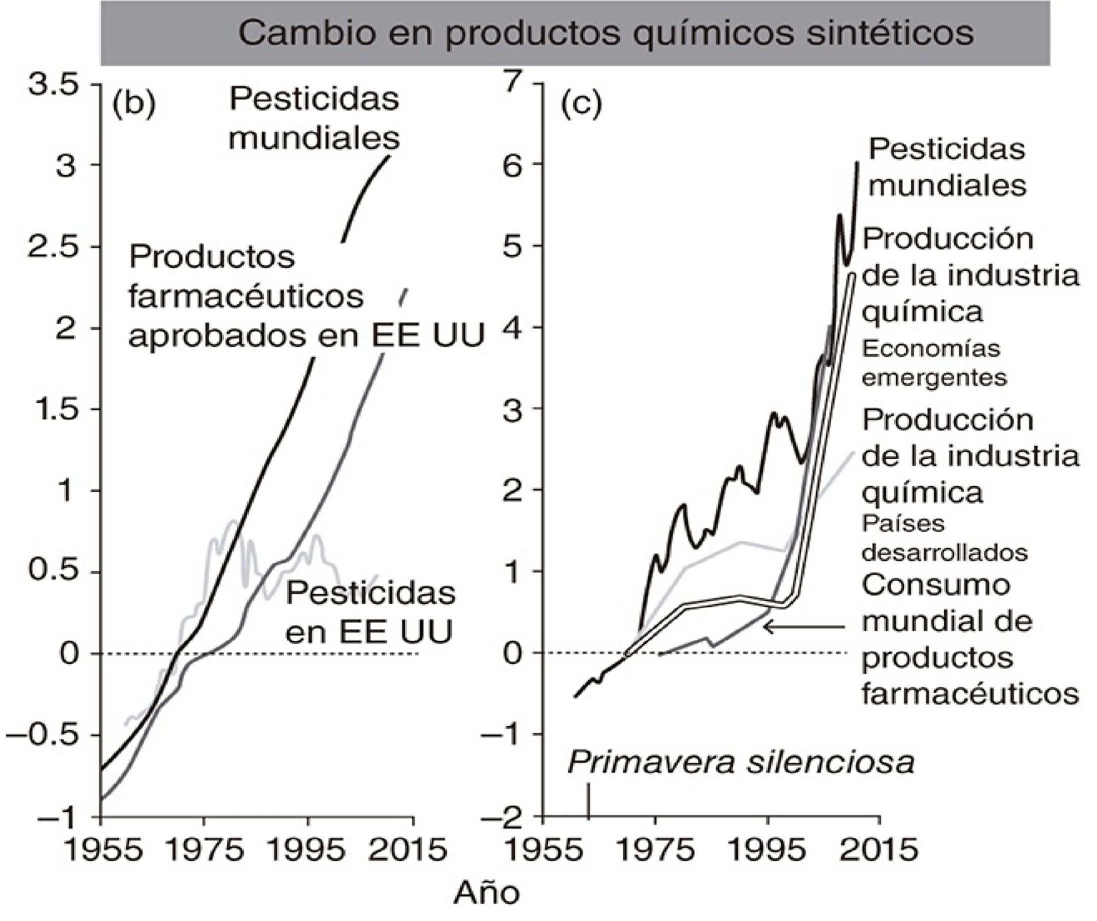
que lanzó Paul Crutzen en 2006, consistente en inyectar en la estratosfera diminutas partículas reflectantes de aerosoles de sulfatos. Una serie de estudios que incluyen modelos informáticos y las estimaciones del enfriamiento global causado por la erupción del monte Pinatubo en 1991 en Filipinas, han confirmado que una flota de aviones a reacción podría esparcir de forma rentable una cantidad suficiente de partículas de sulfatos para enfriar la Tierra hasta varios grados centígrados. Una intervención de este tipo podría evitar incluso el máximo calentamiento global previsto para finales de este siglo (de 4 a 6 grados centígrados). El científico climático David Keith calculó que una reducción de 1 grado centígrado de la temperatura global podría mantenerse con un gasto anual de tan solo 700 millones de dólares, una suma insignificante comparada con los costes de reducir a cero las emisiones, y que podría permitirse un solo país o incluso una sola empresa o persona multimillonaria.

A pesar de las tentaciones de recurrir a una «solución tecnológica» tan barata y factible, una capa de sulfatos tiene un potencial inmenso de efectos secundarios catastróficos, desde sequías devastadoras hasta la desaparición total de las lluvias monzónicas. Permitir la acumulación del CO_2 atmosférico también podría hacer que la suspensión de la inyección de sulfatos tenga unas consecuencias mucho peores que las que esta interrupción pretende evitar. La geoingeniería solar con sulfatos estratosféricos es un ejemplo claro de cómo resolver un problema creando otro aún mayor. Puede que algún día sea la mejor opción, pero sin más investigación, las expectativas que ofrece siguen siendo difusas.

Ícaro

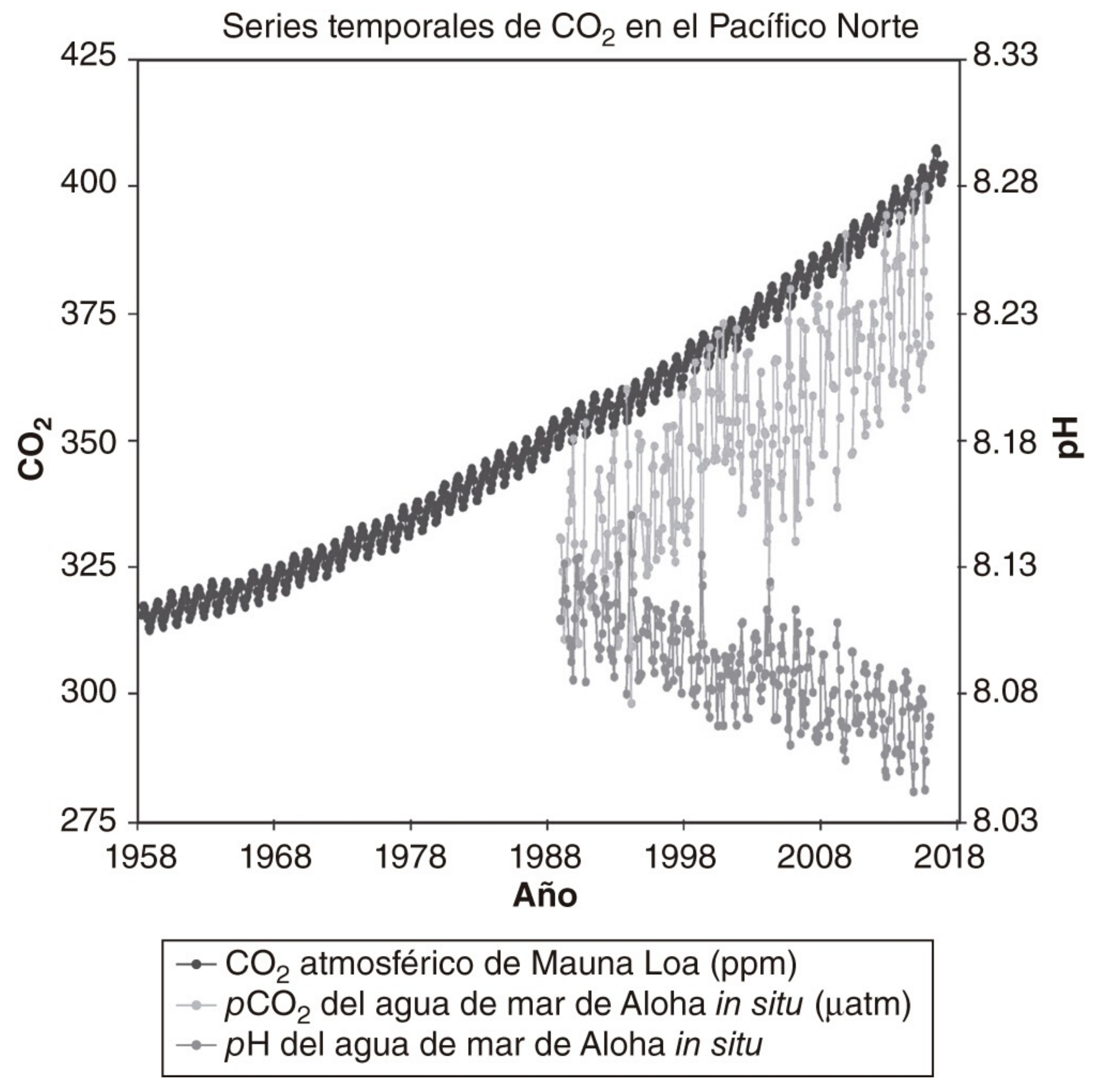
Si el Antropoceno se definiera únicamente por el cambio climático global, las extinciones masivas y la contaminación generalizada, ya sería suficiente. Sin embargo, estos constituyen tan solo algunos de los problemas ambientales a escala planetaria más conocidos. Un único producto químico industrial, como el pesticida DDT, tenía la capacidad de diezmar especies en todo el mundo. En la actualidad se emplean de forma activa más de 85 000 productos químicos industriales y su producción se está acelerando (figura 42). La mayoría de ellos jamás se ha sometido a pruebas para comprobar sus efectos nocivos en los seres humanos, y mucho menos en otras especies ni en el sistema Tierra en su conjunto.


Cambio global
(a)
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
Cambio proporcional respecto de 1970
Fertilizante N
Fertilizante P
Población mundial
CO_2
Tierras agrícolas
Biodiversidad
1955
1975
1995
2015
Año


Cambio en productos químicos sintéticos
(b)
Pesticidas mundiales
Productos farmacéuticos aprobados en EE UU
Pesticidas en EE UU
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
−0.5
−1
(c)
7
6
5
4
3
2
1
0
−1
−2
Pesticidas mundiales
Producción de la industria química
Economías emergentes
Producción de la industria química
Países desarrollados
Consumo mundial de productos farmacéuticos
Primavera silenciosa
1955
1975
1995
2015
Año

42. Cambios globales relativos en (a) impulsores del cambio global, (b) diversidad de productos químicos sintéticos, y (c) fabricación de productos químicos sintéticos.

Más preocupante aún es el hecho de que los cambios ambientales mundiales con capacidad para provocar daños masivos han eludido su detección durante décadas, aun cuando deberían haber sido obvios en todo momento. Dos ejemplos clásicos los encontramos en la acidificación de los océanos (figura 43) y la contaminación con plásticos. Seguramente usted ya sabe que la disolución de dióxido de carbono en el agua la vuelve más ácida. Sin embargo, esta química sencilla no se consideró un problema para los océanos hasta 2003, cuando el especialista en ecología global Ken Caldeira efectuó los cálculos que revelaron la magnitud de la amenaza. El crecimiento de algunos corales ya se está frenando. Si las emisiones de CO_2 no disminuyen, los arrecifes de coral del planeta y muchas especies de mariscos desaparecerán a finales de este siglo, según las comparaciones con intervalos previos de la historia terrestre que tuvieron océanos más ácidos. Y lo que es peor, los mares más cálidos podrían sufrirlo antes. Sin embargo, ni tan siquiera el informe *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*, el resumen más completo que existe de la ciencia del sistema Tierra publicado en 2004, menciona la acidificación de los océanos.



43. Acidificación de los océanos. Cantidades cada vez mayores del CO_2 atmosférico se disuelven en el agua del mar, lo que acidifica (reduce el *pH*) de los océanos. Mediciones en la costa de Hawái.

La contaminación con plásticos podría parecer inevitable si se tiene en cuenta el increíble tonelaje que se produce de ellos. Sin embargo, los científicos solo se han dado cuenta de la magnitud del problema en tiempos recientes. Las partículas microscópicas de plástico de la ropa de microfibra, las microperlas de los cosméticos y productos limpiadores y la degradación de objetos de plástico de mayor tamaño están alcanzando acumulaciones alarmantes en los organismos acuáticos, desde el plancton microscópico hasta los peces. Si la tendencia continúa, la masa de plásticos en los océanos superará la de los peces en el año 2050. Y estas no son las únicas «incertezas» relacionadas con el cambio medioambiental a escala mundial. Por ejemplo,

las hormonas sintéticas y otros productos farmacéuticos se están acumulando en organismos de agua dulce y en ecosistemas enteros, lo que tendrá unas consecuencias bastante desconocidas.

Dadas las dimensiones, el ritmo y la diversidad abrumadores de los cambios medioambientales perjudiciales causados por las sociedades humanas a escala global, es difícil no considerar el Antropoceno como un desastre rotundo. Podría contemplarse como un intervalo en el que la humanidad, o al menos las sociedades industriales más ricas, están conduciéndose a sí mismas y al resto del planeta a la ruina sin ningún sentido. Tal vez sea inevitable la perspectiva de un Antropoceno «malo» caracterizado por entornos tóxicos, una merma de la salud y el bienestar humanos, guerras, una agricultura fallida, ciudades inundadas, un cambio climático catastrófico, extinciones masivas y el desmoronamiento de las sociedades. Puede que Prometeo sea una metáfora totalmente equivocada. Tal vez sea más acertada la insensata arrogancia de Ícaro al atreverse a volar demasiado cerca de las adversidades. Y, sin embargo, a pesar de todo, ahora hay humanos que vuelan. Es más seguro que caminar por la calle.

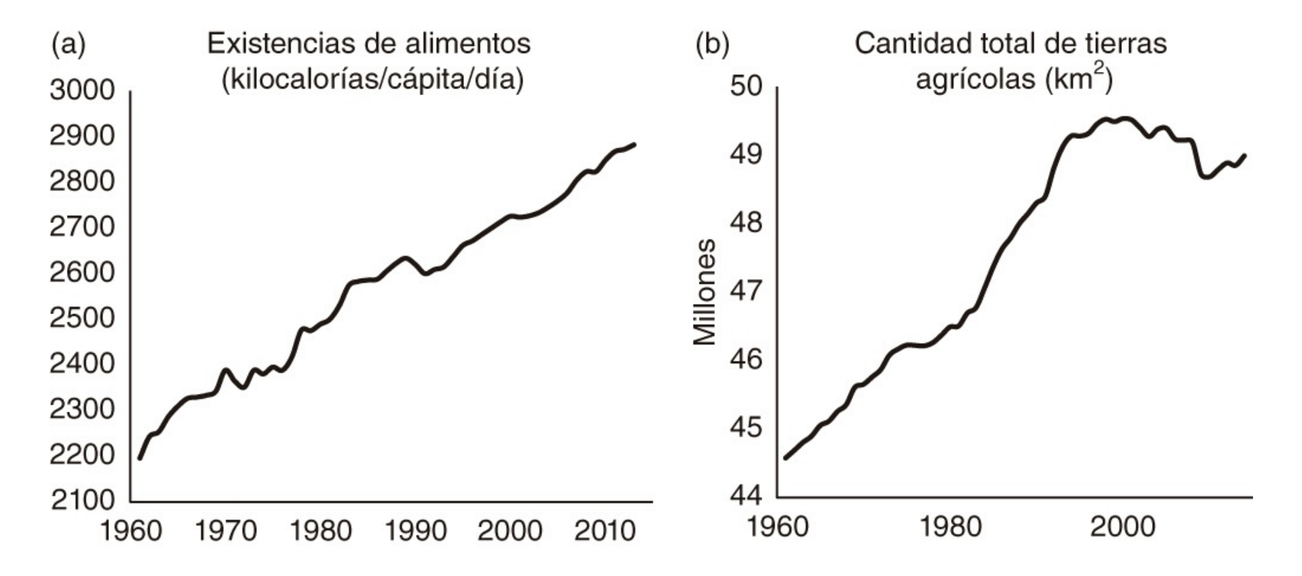
Los Antropocenos buenos

El Antropoceno se define porque la alteración del planeta por parte del ser humano es tan intensa que quedará un registro permanente de ello en las rocas. Sin embargo, hay quien sigue hablando de un «Antropoceno bueno». Yo mismo he sido acusado de acuñar esta expresión, pero tal vez sea Andrew Revkin el culpable más probable. En cualquier caso, recuerdo haberme topado con esta expresión por primera vez en el encuentro sobre el Antropoceno celebrado en Londres en 2011.

Desde un punto de vista científico, el Antropoceno no es ni bueno ni malo; es simplemente una realidad observable. Sin embargo, también debe quedar claro que el Antropoceno aún no ha terminado. Al igual que otros intervalos del tiempo geológico, podría durar millones de años, con o sin nosotros. Antropocenos mejores y peores son posibilidades reales, dependiendo de lo que las sociedades humanas hagan ahora y en el futuro. Además, ya existen «antropocenos» mejores y peores en minúscula, dependiendo de cómo se experimente e interprete esta «era de los seres humanos». Por ejemplo, podría tocarte vivir en una isla somera o ser el último individuo de una especie en vías de extinción.

Imaginar un Antropoceno bueno es de por sí un acto prometeico. Sin embargo, hay muchas maneras de ser prometeico. Schellnhuber y Crutzen imaginaron un Prometeo tecnocrático guiado por una «esfera de pensamiento humano» sapiente, la noosfera, que utilizaría sus poderes globales sin precedentes para revertir el daño ambiental que había causado y para construir un futuro planetario mejor que podría durar millones de años. Para otros prometeicos, llevar una vida más modesta en este planeta podría servir para invertir el juego: la humanidad podría aprender a prosperar sin transformar la Tierra, lo que acabaría con el Antropoceno bastante pronto. Hay muchos otros antropocenos posibles entre los reinos de la tecnocracia y la ecotopía y mucho más allá, desde los negocios de toda la vida hasta una sociedad planetaria gobernada por robots con inteligencia artificial. Pero la pregunta continúa siendo esta: ¿son las sociedades humanas capaces de cambiar para evitar un desastre medioambiental inminente?

Para imaginar un buen antropoceno lo primero que se necesita es ver el futuro mejor que ya hemos creado. Paul Ehrlich no fue bobo al predecir una inanición masiva para la década de 1970; la población humana crecía de una forma exponencial sin perspectivas de detenerse. Sin embargo, las tasas de natalidad humana han disminuido a lo largo de varias décadas y ahora hay más alimentos por persona, incluso sin que se haya producido un aumento significativo de la superficie mundial de territorios destinados a la agricultura (figura 44). Por término medio, las población humana vive más, con mejor salud, con menos violencia, está más formada y tiene acceso a oportunidades inimaginables para sus antepasados. No solo es posible que la población humana se estabilice, utilice menos tierra y viva mejor, sino que ya está sucediendo.



44. (a) Existencias mundiales de alimentos, y (b) cantidad total de tierras destinadas a usos agrícolas.

La esperanza de un Prometeo tecnocrático es algo más que una simple quimera. El Protocolo de Montreal sirvió de verdad para salvar la capa de ozono de la Tierra. Hay una larga lista de actuaciones sociales que han evitado desastres ambientales, desde la prohibición del DDT y otros contaminantes, hasta las leyes de protección de la vida salvaje en peligro que han ayudado a recuperar especies que estaban al borde de la extinción. El aumento de los parques y las zonas protegidas, la aceleración de las inversiones en sistemas y tecnologías para producir energía neutra en carbono, desde la energía solar hasta los coches eléctricos, y el aumento de las protecciones ambientales impulsadas por el colectivo de consumidores, desde el etiquetado de «alimentos marinos sostenibles certificados» hasta los edificios con certificación LEED de eficiencia energética y sostenibilidad, hacen pensar en un futuro mejor para el planeta. La institución Future Earth ha invertido incluso en el proyecto «Seeds for a Good Anthropocene» [«Semillas para un antropoceno bueno»] y en la revista *Anthropocene*, orientada a identificar y promover las innovaciones sociales y ambientales con capacidad para aumentar las probabilidades de generar un buen antropoceno. Las posibilidades de tener antropocenos mucho mejores que el que estamos creando ahora son muy reales.

Hágase la luz

En 2014 se introdujo el término *Anthropocene* en el *Oxford English Dictionary* con la siguiente definición:

> Relativo o referente a la época geológica actual, considerada como el periodo durante el cual la actividad humana ha sido el factor más determinante para el clima y el medio ambiente del planeta.

El Antropoceno ha entrado a formar parte de nuestro léxico y del mundo académico. Varias revistas científicas lo incluyen ahora en su título.

¿Significa la «era de los seres humanos» el fin de la naturaleza? ¿Hemos creado un monstruo? En palabras del especialista en historia de la ciencia Bruno Latour:

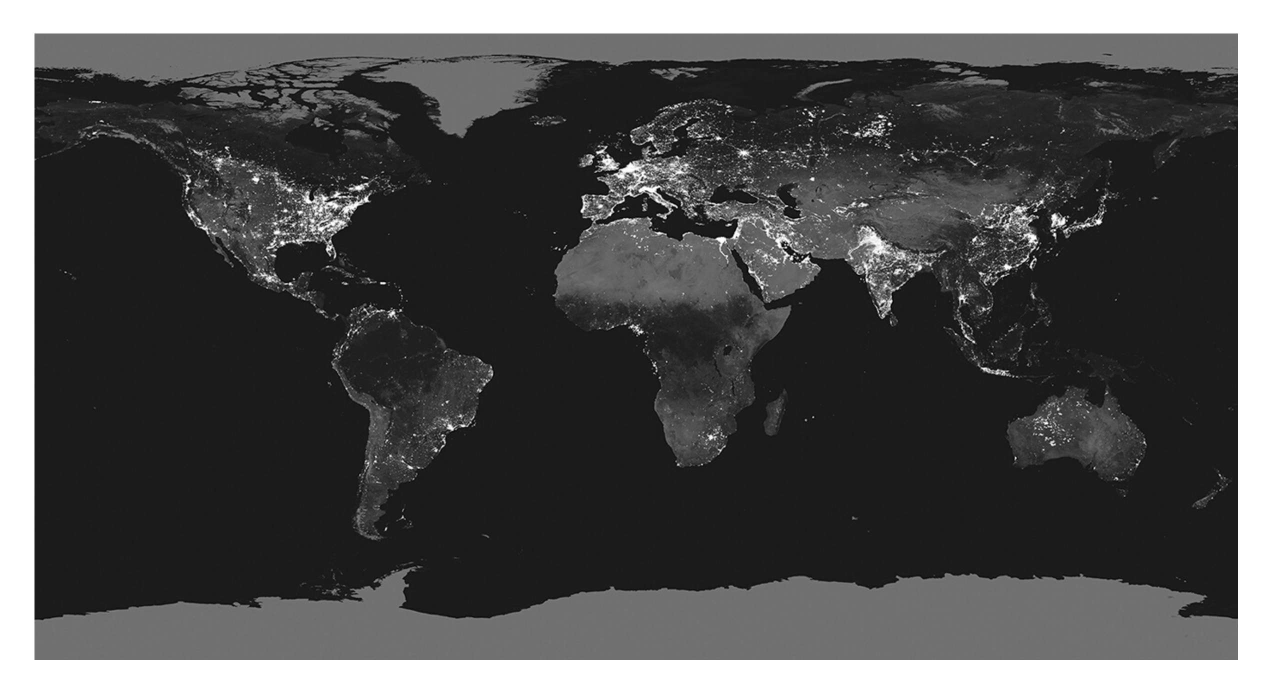
> El delito del doctor Frankenstein no consistió en inventar una criatura con una mezcla de arrogancia y alta tecnología, sino más bien en dejar después a la criatura abandonada a su suerte.

No es este el fin de la Tierra ni de la historia humana. Las condiciones actuales probablemente mantendrán la vida en la Tierra durante al menos otros 1000 millones de años. Es casi seguro que para entonces nuestra especie habrá desaparecido, al igual que la mayoría de las existentes en la actualidad. Todavía es posible que algún ser curioso que mire hacia atrás desde un futuro lejano descubra un planeta que fue transformado para siempre por otra especie.

En este tiempo en el que estamos cambiando el mundo tal como lo conocemos, también debemos cambiar nuestra manera de conocerlo. El Antropoceno nos exige pensar más allá de cada vida individual, que imaginemos el funcionamiento de todo un planeta y los cambios que experimenta a escalas temporales más largas que la duración de las sociedades humanas, desde su principio hasta su fin. Esto casa bien con los esfuerzos más amplios que se están realizando para un replanteamiento de la educación a través de la lente de la «Gran Historia», con planes de estudios que enlacen los procesos y acontecimientos históricos acaecidos desde la Gran Explosión (*Big Bang*) hasta el momento presente y los proyecten hacia el futuro. Se trata de abrir la mente para pensar en el tiempo profundo, como el proyecto «Long Now» de Stewart Brand y Danny Hillis, que está construyendo un reloj diseñado para funcionar durante 10 000 años y que exige la inclusión de años de cinco dígitos, como 02017.

En la obra *Un punto azul pálido*[7], Carl Sagan advirtió que «las visiones que transmitimos a nuestros hijos determinan el futuro. Es relevante cuáles sean esas visiones, porque a menudo se convierten en profecías autocumplidas. Los sueños son como mapas».

Observemos más de cerca ese «punto azul pálido». Nótese el intenso fulgor que despide su hemisferio sumido en la oscuridad de la noche (figura 45). No brilla porque alguien se lo haya propuesto. Sin embargo, brilla debido a la luz que arrojaron innumerables esfuerzos humanos enlazados a lo largo de generaciones de todo el mundo; es un fenómeno emergente, social, accidental. Hasta ahora el Antropoceno ha ocurrido mientras estábamos ocupados en materializar otros planes. Sigue siendo un trabajo en curso.



45. La Tierra de noche. Iluminación nocturna en exteriores detectada desde el espacio mediante satélite por la NASA.

El Antropoceno evidencia que juntos, los seres humanos somos una fuerza de la naturaleza. En el camino que tenemos por delante hay antropocenos mejores y peores. La historia del Antropoceno no ha hecho más que empezar. Aún estamos a tiempo de forjar un futuro en el que tanto la humanidad como el mundo natural no humano prosperen juntos durante milenios. Todavía tenemos la oportunidad de dejar escrito un futuro mejor en el registro fósil permanente de la historia de la Tierra.

Cronología: Posibles inicios del Antropoceno (marcadores GSSP en negrita)

Acontecimiento	*Fechas*	*Marcadores estratigráficos*
Herramientas de piedra	3.2 millones a 2.5 millones de años atrás	Artefactos de piedra
Control del fuego	1.6 millones a 200 000 años atrás	Carbón vegetal
Homo sapiens anatómicamente moderno	~300 000 años atrás	Huesos
Homo sapiens conductualmente moderno	110 000 a 60 000 años atrás	Montaje de artefactos complejos, marcas simbólicas, herramientas avanzadas, etc.
Extinción de megafauna	50 000 a 10 000 años atrás	Huesos, artefactos humanos, carbón vegetal
Cerámica	30 000 a 15 000 años atrás	Minerales de cerámica
Origen de la agricultura	~11 000 años atrás	Polen (de plantas domesticadas y malas hierbas), fitolitos, huesos de animales, carbón vegetal
Agricultura extensiva	~11 000 a 6000 años atrás	**Mínimos de CO_2 en hielo glacial ~8000 años atrás**, polen (de plantas domesticadas y malas hierbas), fitolitos, huesos de animales, carbón vegetal
Producción de arroz, metano de rumiantes	~6000 a 3000 años atrás	**Mínimos de CH_4 en hielo glacial 5020 años atrás**, huesos de animales, suelos de arrozales, polen, fitolitos
Edad del Bronce	~5000 a 3000 años atrás	Artefactos de metal, minería, contaminación, restos de deforestación
Homogeneización biótica (Homogoceno/Homogenoceno)	~5000 a 500 años atrás	Polen, fitolitos, huesos de animales
Edad del Hierro	~3000 a 1000 años	Artefactos de hierro, minería, contaminación, restos de deforestación

	~3000 a 1000 años atrás	Artefactos de hierro, minería, contaminación, restos de deforestación
Suelos antropogénicos	~3000 a 500 años atrás	Materia orgánica del suelo, acumulaciones de fósforo, proporciones de isótopos, polen
Capitalismo (Capitaloceno)	~1450	Ninguna propuesta
Intercambio colombino (Orbis)	1492 a 1610	**Mínimos de CO_2 en hielo glacial de 1610**, polen, fitolitos, huesos, carbón vegetal
Revolución Industrial (Carboceno)	1760 a 1800	Cenizas en suspensión por la quema de carbón, proporciones de isótopos de carbono y nitrógeno, diatomeas en lagos, CO_2 en hielo glacial
La gran aceleración	1945 a 1964	**Núcleos radiactivos (pico de ^{14}C y ^{239}Pu de 1964)**, hollín, plásticos, contaminantes, otros isótopos

Basado en parte en Simon L. Lewis y Mark A. Maslin, «Defining the Anthropocene», *Nature*, 519/7542 (2015), 171-180.

Referencias bibliográficas

1. Orígenes

Kolbert, Elizabeth, «Enter the Anthropocene Age of Man», *National Geographic*, 219/3 (2011), 60-85.
Crutzen, P. J. y Stoermer, E. F., «The "Anthropocene"», *IGBP Newsletter*, 41 (2000), 17-18.
Revkin, A. C., *Global Warming: Understanding the Forecast* (Nueva York: Abbeville Press, Incorporated, 1992), 180.
Burchfield, Joe D., «The Age of the Earth and the Invention of Geological Time», *Geological Society*, London, Special Publications, 143/1 (1 January 1998), 137-143.
Arrhenius, Svante, «On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground», *Philosophical Magazine*, 41 (1896), 237-276.
Report of the Environmental Pollution Panel, President's Science Advisory Committee, «Restoring the Quality of our Environment» (Washington, D. C.: The White House, 1965).

2. El sistema Tierra

Steffen, Will, Crutzen, Paul J. y Mcneill, John R., «The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature», *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36 (2007), 614-621.
NASA Advisory Council. Earth System Sciences Committee, *Earth System Science Overview: A Program for Global Change* (Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1986), 48.
Schellnhuber, H. J., «"Earth System" Analysis and the Second Copernican Revolution», *Nature*, 402 (1999), C19-C23.
Moore III, Berrien *et al.*, «The Amsterdam Declaration on Global Change», en Will Steffen *et al.* (eds.), *Challenges of a Changing Earth: Proceedings*

of the Global Change Open Science Conference, Amsterdam, The Netherlands, 10-13 July 2001 (Nueva York: Springer, 2001), 207-208.

3. El tiempo geológico

Zalasiewicz, Jan *et al.*, «Are we Now Living in the Anthropocene?», *GSA Today*, 18 (1 February 2008), 4-8.
Remane, Jurgen *et al.*, «Revised Guidelines for the Establishment of Global Chronostratigraphic Standards by the International Commission on Stratigraphy (ICS)», *Episodes*, 19/3 (1996), 77-81.
International Commission on Stratigraphy, «Statutes of the International Commission on Stratigraphy, Ratified by IUGS in February, 2002» (International Commission on Stratigraphy, 2002).
Head, Martin J. y Gibbard, Philip L., «Formal Subdivision of the Quaternary System/Period: Past, Present, and Future», *Quaternary International*, 383 (5 October 2015), 4-35.
Gibbard, Philip L. y Lewin, John, «Partitioning the Quaternary», *Quaternary Science Reviews*, 151 (1 November 2016), 127-139.
Anthropocene Working Group of the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy) «Newsletter», No. 1 (2009). Online: [https://quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/].
Zalasiewicz, Jan, Crutzen, P. J. y Steffen, W., «The Anthropocene», en F. M. Gradstein *et al.* (eds.), *The Geologic Time Scale 2012 2-Volume Set* (Oxford: Elsevier Science, 2012), 1033-1040.
Waters, C. N. *et al.* (eds.), *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene* (Geological Society of London Special Publications, Volume 395: Geological Society of London, 2014), 321.
Ruddiman, William F., «The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago», *Climatic Change*, 61 (2003), 261-293.
Zalasiewicz, Jan *et al.*, «When Did the Anthropocene Begin? A Mid-Twentieth Century Boundary Level is Stratigraphically Optimal», *Quaternary International*, 383 (2015), 196-203.

4. La gran aceleración

Steffen, W. *et al.*, *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure* (1st edn, Global Change–The IGBP Series; Berlín: Springer-

Verlag, 2004), 332.
Steffen, Will *et al.*, «The Anthropocene: Conceptual and Historical Perspectives», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (13 March 2011), 842-867.
Ellis, Erle C. *et al.*, «Anthropogenic Transformation of the Biomes, 1700 to 2000», *Global Ecology and Biogeography*, 19 (2010), 589-606.
Smil, Vaclav, *The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics, and Change* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2003), 356.
Vörösmarty, Charles J. y Sahagian, Dork, «Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle», *Bioscience*, 50 (2000), 753-765.
Vitousek, Peter M. y Matson, Pamela A., «Agriculture, the Global Nitrogen Cycle, and Trace Gas Flux», en Ronald S. Oremland (ed.), *Biogeochemistry of Global Change: Radiatively Active Trace Gases. Selected Papers from the Tenth International Symposium on Environmental Biogeochemistry*, San Francisco, 19-24 August 1991 (Boston: Springer US, 1993), 193-208.
Stocker, Thomas F. *et al.* (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).
Steffen, Will *et al.*, «Stratigraphic and Earth System Approaches to Defining the Anthropocene», *Earth's Future*, 4 (2016), 324-345.
Waters, Colin N. *et al.*, «The Anthropocene is Functionally and Stratigraphically Distinct from the Holocene», *Science*, 351/6269 (8 January 2016), aad2622.

5. Ánthrōpos

Smith, Bruce D. y Zeder, Melinda A., «The Onset of the Anthropocene», *Anthropocene*, 4 (2013), 8-13.
Marean, Curtis W., «An Evolutionary Anthropological Perspective on Modern Human Origins», *Annual Review of Anthropology*, 44/1 (2015), 533-556.
Nielsen, Rasmus *et al.*, «Tracing the Peopling of the World through Genomics», *Nature*, 541/7637 (01/19/print 2017), 302-310.
Ellis, Erle C. *et al.*, «Used Planet: A Global History», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (14 May 2013), 7978-7985.
Ruddiman, W. F. *et al.*, «Late Holocene Climate: Natural or Anthropogenic?», *Reviews of Geophysics*, 54/1 (2016), 93-118.

Fuller, Dorian Q. *et al.*, «The Contribution of Rice Agriculture and Livestock Pastoralism to Prehistoric Methane Levels: An Archaeological Assessment», *The Holocene*, 21 (2011), 743-759.
Boivin, Nicole L. *et al.*, «Ecological Consequences of Human Niche Construction: Examining Long-Term Anthropogenic Shaping of Global Species Distributions», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113/23 (6 June 2016), 6388-6396.
Lewis, Simon L. y Maslin, Mark A., «Defining the Anthropocene», *Nature*, 519/7542 (03/12/print 2015), 171-180.
Edgeworth, Matt *et al.*, «Diachronous Beginnings of the Anthropocene: The Lower Bounding Surface of Anthropogenic Deposits», *The Anthropocene Review*, 2/1 (8 January 2015), 33-58.
Ruddiman, William F. *et al.*, «Defining the Epoch we Live in: Is a Formally Designated "Anthropocene" a Good Idea?», *Science*, 348/6230 (2015), 38-39.

6. Oíkos

Kareiva, Peter, Lalasz, Robert y Marvier, Michelle, «Conservation in the Anthropocene», *Breakthrough Journal*, 2 (2011), 26-36.
Leclerc, Georges-Louis (conde de Buffon), *Histoire naturelle générale et particulière: supplement 5: des époques de la nature* (París: Imprimerie Royale, 1778). En: Trischler, Helmuth, «The Anthropocene: A Challenge for the History of Science, Technology, and the Environment», *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 24/3 (2016), 309-335.
Vitousek, P. M. *et al.*, «Human Domination of Earth's Ecosystems», *Science*, 277 (1997), 494-499.
Denevan, W. M., «The Pristine Myth: The Landscape of the Americas in 1492», *Annals of the Association of American Geographers*, 82 (September 1992), 369-385.
Ekdahl, Erik J. *et al.*, «Prehistorical Record of Cultural Eutrophication from Crawford Lake, Canada», *Geology*, 32/9 (1 September 2004), 745-748.
Zalasiewicz, Jan *et al.*, «Making the Case for a Formal Anthropocene Epoch: An Analysis of Ongoing Critiques», *Newsletters on Stratigraphy*, 50/2 (2017), 205-226.
Ceballos, Gerardo *et al.*, «Accelerated Modern Human-Induced Species Losses: Entering the Sixth Mass Extinction», *Science Advances*, 1/5 (2015).

Elton, Charles S., *The Ecology of Invasions by Animals and Plants* (Londres: Butler and Tanner Ltd, 1958), 181.
Vitousek, Peter M. *et al.*, «Human Appropriation of the Products of Photosynthesis», *BioScience*, 36 (1986), 368-373.
Berkes, F. y Folke, C. (eds.), *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience* (Cambridge: Cambridge University Press, 1998), 459.
Sanderson, E. W. *et al.*, «The Human Footprint and the Last of the Wild», *BioScience*, 52 (2002), 891-904.
Ellis, Erle C. y Ramankutty, Navin, «Putting People in the Map: Anthropogenic Biomes of the World», *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6 (2008), 439-447.
Rockstrom, Johan *et al.*, «A Safe Operating Space for Humanity», *Nature*, 461 (2009), 472-475.

7. Politikós

Chakrabarty, Dipesh, «The Climate of History: Four Theses», *Critical Inquiry*, 35 (2009), 197-222.
Crist, Eileen, «On the Poverty of our Nomenclature», *Environmental Humanities*, 3/1 (1 January 2013), 129-147.
Finney, Stanley C. y Edwards, Lucy E., «The “Anthropocene” Epoch: Scientific Decision or Political Statement?», *GSA Today*, 26/3-4 (2016), 4-10.
Wilson, E. O., *Half-Earth: Our Planet’s Fight for Life* (Nueva York: Liveright, 2016), 256.
Caro, T. I. M. *et al.*, «Conservation in the Anthropocene», *Conservation Biology*, 26/1 (2011), 185-188.
Hamilton, Clive, «The Theodicy of the “Good Anthropocene”», *Environmental Humanities*, 7 (2015), 233-238.
Swyngedouw, Erik, «Apocalypse Now! Fear and Doomsday Pleasures», *Capitalism Nature Socialism*, 24/1 (2013), 9-18.
Scourse, James, «Enough “Anthropocene” Nonsense: We Already Know the World is in Crisis», The Conversation (14 January 2016). [http://theconversation.com/enough-anthropocene-nonsense-we-already-know-the-world-is-in-crisis-43082].
Boden, T. A., Marland, G. y Andres, R. J., *Global, Regional, and National Fossil-Fuel* CO_2 *Emissions* (2017). Carbon Dioxide Information Analysis

Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy (Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/ CDIAC/00001_V2017).
Malm, Andreas y Hornborg, Alf, «The Geology of Mankind? A Critique of the Anthropocene Narrative», *The Anthropocene Review*, 1/1 (1 April 2014), 62-69.
Moore, J. W., *Capitalism in the Web of Life: Ecology and the Accumulation of Capital* (Kindle edn, Nueva York: Verso Books, 2015).
Klein, Naomi, «Let Them Drown: The Violence of Othering in a Warming World», *London Review of Books*, 38/11 (2016), 11-14.
Biermann, Frank, «The Anthropocene: A Governance Perspective», *The Anthropocene Review*, 1 (1 April 2014), 57-61.
Heise, Ursula K., «Terraforming for Urbanists», *Novel*, 49/1 (1 May 2016), 10-25.

8. Prometeo

Editorial, «The Human Epoch», *Nature*, 473/7347 (05/19/print 2011).
Zalasiewicz, Jan *et al.*, «The Anthropocene: A New Epoch of Geological Time?», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (13 March 2011), 835-841.
Zalasiewicz, Jan *et al.*, «The Working Group on the Anthropocene: Summary of Evidence and Interim Recommendations», *Anthropocene* (2017; in press). [https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.09.001].
Hazen, Robert M. *et al.*, «On the Mineralogy of the "Anthropocene Epoch"», *American Mineralogist*, 102/3 (2017), 595-611.
Zalasiewicz, Jan *et al.*, «Scale and Diversity of the Physical Technosphere: A Geological Perspective», *The Anthropocene Review*, 4/1 (28 November 2016), 9-22.
Van der Pluijm, Ben, «Hello Anthropocene, Goodbye Holocene», *Earth's Future*, 2/10 (2014), 566-568.
Gaffney, Owen y Steffen, Will, «The Anthropocene Equation», *The Anthropocene Review* (2017), <2053019616688022.].
Crutzen, Paul J., «A Critical Analysis of the Gaia Hypothesis as a Model for Climate/Biosphere Interactions», *Gaia*, 11/2 (2002), 96-103.
Jones, Nicola, «Solar Geoengineering: Weighing Costs of Blocking the Sun's Rays», *Yale Environment* 360 (2014). [https://e360.yale.edu/features/solar_geoengineering_weighing_costs_of_b
Bernhardt, Emily S., Rosi, Emma J. y Gessner, Mark O., «Synthetic Chemicals as Agents of Global Change», *Frontiers in Ecology and the*

Environment, 15/2 (2017), 84-90.
Caldeira, Ken y Wickett, Michael E., «Oceanography: Anthropogenic Carbon and Ocean pH», *Nature*, 425/6956 (09/25/ print 2003), 365-5.
Zalasiewicz, Jan *et al.*, «The Geological Cycle of Plastics and their Use as a Stratigraphic Indicator of the Anthropocene», *Anthropocene*, 13 (2016), 4-17.
Bennett, E. M. *et al.*, «Bright Spots: Seeds of a Good Anthropocene», *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14/8 (2016), 441-448.
Latour, Bruno, «Love your Monsters», *Breakthrough Journal*, 2 (Fall 2011), 21-28.
Sagan, Carl, *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space* (Nueva York: Random House, 1994), 384. Versión en castellano: *Un punto azul pálido.* Trad. de Marina Widmer Caminal. Barcelona: Editorial Planeta, 1996.

Lecturas adicionales

1. Orígenes

Carson, Rachel, *Silent Spring* (Houghton Mifflin, 1962), 368. Versión en castellano: *Primavera silenciosa*. Trad. de Joan Domènec Ros. Barcelona: Crítica, 2013. Libro clásico que contribuyó a desencadenar el movimiento ecologista de los años 60 y posteriores.

Leddra, M., *Time Matters: Geology's Legacy to Scientific Thought* (Wiley, 2010). Una amplia visión del tiempo geológico como elemento que ha contribuido al desarrollo de la ciencia.

Mckibben, Bill, *The End of Nature* (Random House, 1989), 226. Un libro enormemente influyente sobre la transformación de la Tierra debido al cambio climático antropogénico.

Marsh, George Perkins, *Man and Nature: or, Physical Geography as Modified by Human Action* (Scribner, 1865). Uno de los primeros libros modernos que han descrito los drásticos cambios ambientales que han causado las sociedades humanas.

Schwägerl, Christian y Crutzen, P. J., *The Anthropocene: The Human Era and How It Shapes our Planet* (Synergetic Press, 2014), 248. Una visión general sólida de los orígenes y el futuro del Antropoceno.

2. El sistema Tierra

Lenton, Tim y Watson, Andrew, *Revolutions that Made the Earth* (Oxford University Press, 2011). Una guía accesible sobre la ciencia del sistema Tierra para entender el funcionamiento actual de la Tierra.

Lovelock, J., *Gaia: A New Look at Life on Earth* (Oxford University Press, 1979). Versión en castellano: *Gaia, una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Trad. de Alberto Jiménez Rioja. Barcelona: Ediciones Orbis, 1985. El libro clásico sobre la hipótesis Gaia.

Vernadski, Vladímir I., *Biosphere: Complete Annotated Edition* Copernicus Books (Springer Verlag, 1998). Versión en castellano: *La biosfera*. Trad. de M.ª Victoria López Paños. Madrid: Fundación Argentaria-Visor Distribuidores, 1997. Una traducción de la obra clásica de 1926 de Vernadski.

3. El tiempo geológico

Gradstein, Felix M., Ogg, James George y Schmitz, Mark (eds.), *The Geologic Time Scale 2012, 2-volume set* (Elsevier, 2012). Texto de referencia sobre el tiempo geológico. Incluye capítulos sobre el Cuaternario, la escala temporal de la prehistoria humana y un capítulo nuevo dedicado al Antropoceno.

Ogg, J. G., Ogg, G. y Gradstein, F. M., *A Concise Geologic Time Scale: 2016* (Elsevier Science, 2016). Un libro accesible y actualizado sobre el tiempo geológico de los editores del libro de texto estándar en geología sobre el tiempo geológico.

Zalasiewicz, Jan, *The Earth After Us: What Legacy Will Humans Leave in the Rocks?* (Oxford University Press, 2008), 272.

En línea: Lista completa de los GSSP aprobados: Comisión Internacional de Estratigrafía: [https://stratigraphy.org/gssps/].

Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Global_Boundary_Stratotype_Sectic

4. La gran aceleración

McNeill, John Robert, *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World* (W. W. Norton & Company, 2001). Versión en castellano: *Algo nuevo bajo el sol: Historia medioambiental del mundo en el siglo* XX. Trad. de José Luis Gil Aristu. Madrid: Alianza, 2003. Una historia medioambiental clásica del siglo XX.

McNeill, J. R. y Engelke, P., *The Great Acceleration* (Harvard University Press, 2016), 288. Una historia medioambiental de la gran aceleración.

Steffen, W. *et al.*, *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure* (1st ed., Global Change: The IGBP Series; Springer-Verlag, 2004). La obra clásica que define la ciencia del sistema Tierra en relación con el cambio ambiental global, incluida la alteración humana del sistema Tierra, y que incluye un capítulo completo sobre el Antropoceno. El

Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP) publicó con anterioridad, en 2001, los elementos esenciales del libro en un resumen de 32 páginas.

5. Ánthrōpos

Henrich, J., *The Secret of our Success: How Culture Is Driving Human Evolution, Domesticating our Species, and Making Us Smarter* (Princeton University Press, 2015). Obra sobre la evolución de las excepcionales habilidades sociales humanas.

Mann, Charles C., *1491: New Revelations of the Americas Before Columbus* (Knopf, 2005). Versión en castellano: *1491: Una nueva historia de las Americas antes de Colón*. Trad. de Martín Martínez-Lage y Federico Corriente. Madrid: Taurus, 2006. Un relato muy ameno sobre las consecuencias sociales y ecológicas del intercambio colombino en las Américas.

Ruddiman, William E., *Plows, Plagues, and Petroleum: How Humans Took Control of Climate* (Princeton University Press, 2005), 224. Un libro excelente sobre el cambio climático antropogénico y la ciencia del clima en general.

6. Oíkos

Cohen, Joel E., *How Many People Can the Earth Support?* (W. W. Norton, 1995), 352. Un libro clásico sobre poblaciones humanas.

Kareiva, Peter y Marvier, Michelle, *Conservation Science: Balancing the Needs of People and Nature* (Roberts and Company, 2011), 576. Un libro de texto sobre la ecología de conservación en el Antropoceno.

Kolbert, E., *The Sixth Extinction: An Unnatural History* (Bloomsbury, 2014), 319. Versión en castellano: *La sexta extinción: una historia nada natural*. Trad. de Joan Lluís Riera. Barcelona: Editorial Crítica, 2015. Una historia muy accesible de la extinción de especies.

Marris, Emma, *Rambunctious Garden: Saving Nature in a Post-Wild World* (Bloomsbury, USA, 2011), 224. Un análisis de la ecología y la conservación en el Antropoceno.

Thomas, Chris D., *Inheritors of the Earth: How Nature Is Thriving in an Age of Extinction* (Penguin, 2017), 320. Obra dedicada a los cambios evolutivos ante la extinción.

7. Politikós

Bonneuil, C. y Fressoz, J. B., *The Shock of the Anthropocene: The Earth, History and Us* (Verso Books, 2016), 306. Una historia del Antropoceno desde un punto de vista político de izquierdas.

Davis, Heather y Turpin, Étienne, *Art in the Anthropocene: Encounters Among Aesthetics, Politics, Environments and Epistemologies* (Open Humanities Press, 2015), 416. Libro publicado que estudia el Antropoceno dentro de las artes.

Haraway, D. J., *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene* (Experimental Futures: Duke University Press, 2016), 312. Versión en castellano: *Seguir con el problema: Generar parentesco en el Chthuluceno*. Trad. de Helen Torres. Bilbao: Edición Consonni, 2019. Consideraciones de Donna Haraway sobre el Antropoceno.

Moore, J. *et al.*, *Anthropocene or Capitalocene? Nature, History, and the Crisis of Capitalism* (PM Press, 2016), 240. Obra publicada con diversos puntos de vista críticos sobre el Antropoceno.

Oreskes, Naomi y Conway, Erik M., *Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming* (Bloomsbury Publishing, 2011), 368. Una obra clásica sobre la política de la ciencia del clima escrita por un miembro del Grupo de Trabajo del Antropoceno.

Purdy, J., *After Nature: A Politics for the Anthropocene* (Harvard University Press, 2015), 336. Un análisis muy accesible de las implicaciones políticas del Antropoceno.

El «Anthropocene Curriculum» del centro Haus der Kulturen der Welt (HKW) está disponible aquí: [https://www.anthropocene-curriculum.org/].

8. Prometeo

Brand, Stewart, *Whole Earth Discipline: An Ecopragmatist Manifesto* (Viking Penguin, 2009), 325. El prometeico por excelencia expone las oportunidades del Antropoceno.

Christian, David y McNeill, W. H., *Maps of Time: An Introduction to Big History* (University of California Press, 2004), 667. La Gran Historia conecta la historia del origen de la ciencia contemporánea con la historia de la humanidad. Es un movimiento pedagógico que propone planes

curriculares gratuitos en internet respaldados por el Big History Project: [https://www.bighistoryproject.com/home].
Defries, Ruth, *The Big Ratchet: How Humanity Thrives in the Face of Natural Crisis* (Basic Books, 2014), 273. Una explicación de por qué los seres humanos transformamos los entornos de la Tierra y qué debe hacerse al respecto.
Grinspoon, David, *Earth in Human Hands: Shaping our Planet's Future* (Grand Central Publishing, 2016). Una visión prometeica del Antropoceno por parte de un astrobiólogo.
Morton, Oliver, *The Planet Remade: How Geoengineering Could Change the World* (Princeton University Press, 2015). Un libro impactante sobre geoingeniería climática.
Pinker, Stephen, *The Better Angels of our Nature: Why Violence Has Declined* (Penguin Publishing Group, 2011), 832. Versión en castellano: *Los ángeles que llevamos dentro: El declive de la violencia y sus implicaciones*. Trad. de Joan Soler Chic. Barcelona: Paidós, 2012. Una evaluación del descenso a largo plazo de la violencia en las sociedades humanas.
Shellenberger, Michael y Nordhaus, Ted (eds.), *Love your Monsters: Postenvironmentalism and the Anthropocene* (Kindle edn.: Breakthrough Institute, 2011), 102. Análisis prometeicos de la situación del Antropoceno y qué hacer al respecto, incluido el ensayo que figura en el título de Bruno Latour.

Lecturas en línea:

Revista *Anthropocene* de la institución Future Earth:
[http://www.anthropocenemagazine.org/].
Nuestro mundo en datos:
[https://ourworldindata.org/]. Ofrece datos y análisis útiles sobre el cambio social y ambiental a escala mundial.
La institución Long Now Foundation:
[https://longnow.org/]. Esta fundación se creó en 1996 para fomentar el pensamiento y la responsabilidad a largo plazo durante de los próximos 10 000 años.

Publicaciones sobre el Antropoceno:

The Anthropocene Review
[http://journals.sagepub.com/home/anr].
Anthropocene
[https://www.journals.elsevier.com/anthropocene/].
Elementa: Science of the Anthropocene
[https://online.ucpress.edu/elementa].

Relación de ilustraciones

Recuadro 6.2 Figura 1 en IPCC, 2013: «Climate Change 2013: The Physical Science Basis». Aportación del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [Stocker, T. F. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, 1535.

17. El ciclo global del nitrógeno.

18. Variaciones del CO_2 atmosférico en los últimos 450000 años.

Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure (2004), p. 134. Steffen, W. *et al.* © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, con permiso de Springer Nature.

19. Cambios globales en las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono entre 1800 y 2000.

20. Cambios globales en la temperatura superficial de la Tierra entre 1850 y 2000.

21. Cambios globales en la temperatura superficial de la Tierra durante el Holoceno.

Extraído de Marcott *et al.* 2013. «A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years». *Science* 339:1198-1201, figura 1B. Reproducido con permiso de la AAAS.

22. Cambio de régimen del Antropoceno.

Figura 5 de Steffen *et al.* 2016. «Stratigraphic and Earth System Approaches to Defining the Anthropocene». *Earth's Future* 4:324-45.

23. Nuevos marcadores del cambio antropogénico.

Extraído de Waters *et al.* 2016. «The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene». *Science* 351, figura 1A. Reproducido con permiso de la AAAS.

24. Mapa de la diáspora humana fuera de África.

Reproducido con permiso de Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, Nielsen *et al.* «Tracing the peopling of the world through genomics». 541:302-310, copyright (2017).

25. Cacería social.

Wikimedia Commons/CC-BY-SA-4.0.

26. Núcleos de domesticación.

Figura 1 de Larson, G. *et al.* «Current perspectives and the future of domestication studies», *Proceedings of the National Academy of Sciences* (2014) 111:6139-6146. Reproducido con permiso.

27. Cronología del desarrollo agrícola primigenio.

Diagrama basado, con permiso, en Fuller, Dorian Q. *et al.*, «Comparing Pathways to Agriculture», *Archaeology International*, 18 (2015), 61-66.

28. Mapamundi de la historia del empleo de la tierra.

Basado en Ellis, Erle C. *et al.*, «Used planet: A global history», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (14 de mayo de 2013), 7978-7985.

29. La hipótesis de Ruddiman.

Basado en Kaplan *et al.* 2011. «Holocene carbon emissions as a result of anthropogenic land cover change». The Holocene 21:775-791. Con la amable autorización de Jed Kaplan.

30. Emisiones de metano procedentes de tierras dedicadas a la producción de arroz de secano y de regadío.

Fuller, D. Q. *et al.* «The contribution of rice agriculture and livestock pastoralism to prehistoric methane levels: An archaeological assessment». *The Holocene* 21(5), pp. 743-759. Copyright © 2011 de los autores. Reproducido con permiso de SAGE Publications, Ltd.

31. Propuestas de GSSP para el Antropoceno temprano.

Reproducido con permiso de Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, Simon L. Lewis y Mark A. Maslin, «Defining the Anthropocene», 519, 171-180 copyright (12 de marzo de 2015), figura 1.

32. Perfil estratigráfico de depósitos antropogénicos en un asentamiento de Siria.

Figura 8.2 de Moore *et al.* (2000): *Village on the Euphrates: From Foraging to Farming at Abu Hureyra*, Oxford University Press.

33. El sistema de tres edades de la arqueología.

34. Transformación ecológica a largo plazo de los paisajes.

Figura 2 de Boivin *et al.* 2016. «Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:6388-6396.

35. Señales estratigráficas de la actividad humana en un testigo de sedimentos del lago Crawford.

Basado en la figura de Zalasiewicz, Jan *et al.*, «Making the case for a formal Anthropocene Epoch: an analysis of ongoing critiques», *Newsletters on Stratigraphy*, 50/2 (2017), 205-226, utilizando datos de Ekdahl, Erik J. *et al.*, «Prehistorical record of cultural eutrophication from Crawford Lake, Canada», *Geology*, 32/9 (1 de septiembre, 2004), 745-748. Utilizado con permiso.

36. Gráfica acumulativa de extinciones de especies de vertebrados en relación con la tasa de fondo.

Reeditado con permiso de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS), a partir de Ceballos *et al.* 2015, «Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction», *Science Advances* 1, figuras 1A y B; permiso obtenido a través de Copyright Clearance Center, Inc. http://advances.sciencemag.org/content/1/5/e1400253.full.

37. Diagrama que ilustra la interacción combinada de los sistemas socioecológicos.

Extraído de http://wiki.resalliance.org/index.php/Bounding_el_sistema_nivel_2.

38. Mapamundi de los biomas antropogénicos (antromas) en el año 2000.

Basado en Ellis *et al.* «Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000». *Global Ecology and Biogeography* 19:589-606.

39. Historia de la población humana.

Tga.D basado en el trabajo de Loren Cobb/CC-BY-SA-3.0, a partir de los datos originales de las proyecciones de la ONU de 2010 y las estimaciones históricas del Census Bureau historical estimates, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World-Population-1800-2100.svg. Y Max Roser/CC-BY-SA, https://ourworldindata.org/world-population-growth/#key-changes-in-population-growth.

40. Límites planetarios.

41. Acumulación de emisiones de carbono entre 1800 y 2010.

Boden *et al.* «Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO_2 Emissions, Carbon Dioxide». Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 201.

42. Cambios globales relativos en impulsores del cambio global, diversidad de productos químicos sintéticos, y fabricación de productos químicos sintéticos.

Bernhardt *et al.* «Synthetic chemicals as agents of global change», *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15/2 (2017), 84-90, figura 1. John Wiley and Sons © Ecological Society of America.

43. Acidificación de los océanos.

Datos: Mauna Loa (ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt) ALOHA (http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/products/HOT_surface_CO2.txt). Referencia: J. E. Dore et al. 2009. «Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific». *Proceedings of the National Academy of Sciences* USA 106: 12235-12240. Utilizado con permiso.

44. Existencias mundiales de alimentos, y cantidad total de tierras destinadas a usos agrícolas.

(a) Suministro mundial de alimentos: FAO. FAOSTAT. Food supply (kcal/capita/day). (Última actualización: 18-03-2017). Consultado el 21-03-2017. URI: http://www.fao.org/faostat/en/#data. Reproducido con permiso.

(b) Cantidad total de tierras de uso agrícola: FAO. FAOSTAT. Lands (Agricultural area). (Última actualización: 18-03-2017). Consultado el 21-03-2017. URI: http://www.fao.org/faostat/es/#data. Reproducido con permiso.

45. La Tierra de noche.

NASA Earth Observatory.



Erle Christopher Ellis (nacido el 11 de marzo de 1963 en Washington, DC) es un científico ambiental estadounidense. El trabajo de Ellis investiga las causas y consecuencias de los cambios ecológicos a largo plazo causados por los humanos a escala local y global, incluidos los relacionados con el Antropoceno. Desde 2015 es profesor de Geografía y Sistemas Ambientales en la Universidad de Maryland, condado de Baltimore, donde dirige el Laboratorio de Antroecología.

Notas

[1] Aunque en castellano se suele citar de este modo, la traducción literal del título original de esta obra de Darwin *(The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex)* sería «La ascendencia del hombre y la selección en relación con el sexo». (*N. de la T.*) **<<**

[2] Vernadski, Vladímir: *La biosfera*. Trad. de M.ª Victoria López Paños. Madrid: Fundación Argentaria-Visor Distribuidores, 1997. (*N. de la T.*) <<

[3] Carson, Rachel: *Primavera silenciosa*. Trad. de Joandomènec Ros. Barcelona: Crítica, 2013. (*N. de la T.*) **<<**

[4] Smith, Betty: *Un árbol crece en Brooklyn*. Trad. de Rojas Clavell. Barcelona: Debolsillo, 2009. (*N. de la T.*) **<<**

[5] Carson, Rachel: *Primavera silenciosa*. Trad. de Joandomènec Ros. Barcelona: Crítica, 2013. (*N. de la T.*) **<<**

[6] Malthus, Thomas Robert: *Ensayo sobre el principio de la población*. Trad. de José María Noguera y Joaquín Miquel. Madrid: Akal, 1990. (*N. de la T.*) <<

[7] Sagan, Carl: *Un punto azul pálido*. Trad. de Marina Widmer Caminal. Barcelona: Editorial Planeta, 1996. (*N. de la T.*) **<<**

